Handwörterbuch der Naturwissenschaften.

Achter Band.

Handwörterbuch
der
Naturwissenschaften

Herausgegeben von

Prof. Dr. E. Korschelt-Marburg (Zoologie)
Prof. Dr. G. Linck-Jena (Mineralogie und Geologie)
Prof. Dr. F. Oltmanns-Freiburg (Botanik)
Prof. Dr. K. Schaum-Leipzig (Chemie)
Prof. Dr. H. Th. Simon-Göttingen (Physik)
Prof. Dr. M. Verworn-Bonn (Physiologie)
Dr. E. Teichmann-Frankfurt a. M. (Hauptredaktion)

Achter Band

Quartärformation — Sekretion

Mit 964 Abbildungen

JENA
Verlag von Gustav Fischer
1913

Inhaltsübersicht.

Nur die selbständigen Aufsätze sind hier aufgeführt. Eine Reihe von Verweisungen findet sich innerhalb des Textes und ein später herauszugebendes Sachregister wird nähere Auskunft geben.

Q.

R.

S.

Q.

Quartärformation.

Diluvium und Alluvium.

1. Die Namen Quartärformation, Diluvium und Alluvium und ihre Synonyme. 2. Charakterisierung der Quartärformation als Bildung einer Zeit periodischer Klimaschwankungen. 3. Paläontologische Charakterisierung. 4. Facies. 5. Verbreitung. 6. Gliederung. 7. Nutzbarkeit.

1. Die Namen Quartärformation, Diluvium und Alluvium und ihre Synonyme. Als Quartärformation wird die jüngste, alle nachtertiären Gesteinskörper umfassende geologische Formation bezeichnet. Die Quartärformation wird gewöhnlich in ein älteres Diluvium und ein jüngeres Alluvium gegliedert. Statt der Namen Diluvium und Alluvium werden auch die Namen Pleistocän oder richtiger Plistocän und Holocän gebraucht. Unter Plistocän wird jetzt vielfach nicht nur das Diluvium, sondern das gesamte Quartär verstanden. Das nach Analogie der Namen für die einzelnen Glieder der Tertiärformation gebildete Wort Plistocän deutet an, daß die Dauer der Bildungszeit des Quartärs der Größenordnung nach nicht etwa derjenigen der gesamten Tertiärformation, sondern nur etwa derjenigen einer einzelnen der Abteilungen dieser Formation entspricht. Seit die Diluvialzeit als eine Zeit ungewöhnlich großer Entfaltung von Gletschereis erkannt wurde, nannte man dieselbe vielfach schlechthin die Eiszeit und das auch noch, als man vordiluviale Eiszeiten kennen gelernt hatte. Neuerdings weicht die Bezeichnung Eiszeit für die Diluvialzeit mehr und mehr dem seit der Erkenntnis einer Mehrzahl diluvialer Eiszeiten passenderen Ausdrucke Eiszeitalter. Da es sich herausgestellt hatte, daß die zunächst am sinnfälligsten in den Eiszeiten zum Ausdrucke kommenden diluvialen Klimaschwankungen ganz allmählich nach der Gegenwart hin abklingen, versteht man jetzt unter Eiszeitalter vielfach die ganze Quartärperiode.

2. Charakterisierung der Quartärformation als Bildung einer Zeit periodischer Klimaschwankungen. Die Quartärperiode ist durch eine zeitweise das heutige — und, soviel wir wissen, auch jedes frühere — Maß weit überschreitende Ausdehnung von Gletschereis ausgezeichnet. Das Wachsen des Gletschereises erfolgte in verschiedenen Glazial- oder Eiszeiten, welche durch Zeiten eines Rückzuges des Gletschereises auf oder unter sein heutiges Maß, die Interglazial- oder Zwischeneiszeiten, unterbrochen wurden. Das bezeichnendste dieser Vorgänge ist darin zu sehen, daß es sich in ihnen um die Folgen periodischer Klimaschwankungen handelt. Diese Klimaschwankungen sind in dem Artikel „Eiszeiten" behandelt. Hier ist nur ihr Einfluß auf die Ausbildung der Quartärformation zu würdigen. Dieser besteht in einem periodischen Wechsel klimatisch bedingter Facies im petrographischen wie im paläontologischen Sinne: Im Quartär einer und derselben Gegend folgen Ablagerungen, Verwitterungs- und Abtragungserscheinungen, wie Fossilienbestände verschiedener klimatisch bedingter Facies periodisch aufeinander.

So folgen beispielsweise in quartären Vergletscherungsgebieten mehrere Komplexe von Glazialablagerungen aufeinander, getrennt durch Abtragungsflächen, Verwitterungsrinden und lokal auch Interglazialablagerungen. So zeigen die Ablagerungen verschiedener Interglazialablagerungen in einem und demselben Gebiete sehr ähnliche, oft — vorläufig wenigstens — ununterscheidbare Fossilienbestände. So beobachtet man am Rande quartärer Vereisungsgebiete eine Wechsellagerung von Ablagerungen mit Fossilienbeständen kälteren, glazialen und wärmeren, interglazialen Klimas.

Die periodischen Klimaschwankungen und

ihre Folgen für die Ausbildung der Ablagerungen und ihrer Fossilienbestände erscheinen als so charakteristisch für das Quartär, daß es sich empfiehlt, sie für die Abgrenzung des Quartärs gegen das Tertiär zu verwenden, also die Grenze zwischen beiden da zu ziehen, wo die ersten Anfänge der erwähnten Klimaschwankungen bemerkbar werden.

3. Paläontologische Charakterisierung. Die Fossilienbestände der quartären Ablagerungen bestehen in noch höherem Maße als diejenigen der jüngsten tertiären aus heute noch lebenden Arten. Das gilt in erster Linie für die Pflanzen und Wirbellosen, unter denen erloschene Arten in den quartären Ablagerungen selten mehr als einige wenige Prozente ausmachen. Unter den Wirbeltieren, insbesondere den Vögeln und den Säugetieren findet sich ein sehr viel höherer, oft nahe an 100 herankommender Prozentsatz ausgestorbener Arten, daneben auch ein in den verschiedenen Teilen der Erde verschieden großer Prozentsatz ausgestorbener Gattungen und noch höherer systematischer Einheiten. Diese Gruppen, und zwar die ungleich vollständiger überlieferten Säugetiere weit mehr als die Vögel, sind daher in erster Linie zu einer kurzen paläontologischen Charakterisierung des Quartärs zu brauchen.

Als Gruppen, welche, nach Formenmannigfaltigkeit und Körpergröße zu urteilen, entschieden im Quartär, und zwar bereits vor der Gegenwart den Höhepunkt ihrer Entwickelung erreicht haben, und deshalb in erster Linie als charakteristisch für die quartäre Lebewelt zu gelten haben, sind besonders zu nennen: mehrere Gruppen von Laufvögeln, Ratitae, in Australien, Neuseeland (die artenreichen, bis 3,5 m Höhe erreichenden Moas, † Dinornithidae[1])) und Madagaskar; die spezifisch australischen Gruppen der Diprotodontia unter den Beuteltieren (zum Teil riesige Känguruhs, Macropodidae; Wombate, Phascolomyidae, bis zu Ponygröße; † Diprotodontidae bis fast zu Rhinozerosgröße); die Bären der Gattung Ursus in der alten Welt (die größte Art der Höhlenbär, † Ursus spelaeus Rosenm.); die Riesenfaultiere † Gravigrada (mit dem ungefähr elefantengroßen † Megatherium) und die Riesengürteltiere, † Glyptodontidae (bis etwa rhinozerosgroß), in Süd- und zum Teil auch Nordamerika; die Elefanten der Gattung Elephas in der alten Welt und auch Amerika; die den Rhinozeroten verwandte, aber doch recht isoliert stehende, ausschließlich diluviale Gattung † Elasmotherium in Europa und Asien; die einzehigen Pferde der Gattung Equus in der alten Welt und in Amerika; die Moschusochsen, Ovibovinae, besonders in Nordamerika, und die Halbaffen, Prosimiae, Madagaskars († Megaladapis von Menschengröße).

Einige Gruppen erreichen ihren Höhepunkt um die Wende von Tertiär- und Quartärperiode, so z. B. die eigenartigen südamerikanischen Huftiere der Familie der † Toxodontidae; † Stegodon, das Bindeglied zwischen † Mastodon und Elephas, in Asien und die Mehrzahl der spezialisierteren und dementsprechend durch kompliziertere Geweihe ausgezeichneten Hirsche, Cervinae, in der alten Welt und zum Teil auch in Nordamerika.

Andere Gruppen zeigen im Quartär bis zur Gegenwart eine Zunahme der Formenmannigfaltigkeit, ohne daß klar ersichtlich wäre, ob sie den Höhepunkt ihrer Entwickelung bereits erreicht haben, so z. B.: die Rinder, Bovinae, die Schafe und Ziegen, Ovicaprinae, besonders in der alten Welt, weniger in Nordamerika, und die Menschen, Hominidae, in der alten Welt, Amerika und Australien.

Viele Gruppen, die bereits in der jüngeren Tertiärzeit den Höhepunkt ihrer Entwickelung erreicht haben, reichen noch mehr oder weniger weit in die Quartärperiode hinein, so z. B.: die Säbeltiger, † Machairodus, in der alten Welt und in Amerika; † Mastodon in Amerika und vielleicht auch in der alten Welt und die eigenartigen, ausschließlich südamerikanischen Huftierfamilien der † Macraucheniidae und † Typotheriidae.

Die quartären Säugetiere Australiens, Südamerikas und auch Nordamerikas entfernen sich weit mehr von lebenden Typen als diejenigen der alten Welt. In der alten Welt sind ausgestorbene Gattungen vereinzelte Erscheinungen; in Nordamerika, besonders aber Südamerika und auch Australien sind solche reichlich und ausgestorbene noch höhere systematische Einheiten in einiger Anzahl vorhanden.

4. Facies. Die quartären Gesteine unterscheiden sich in der Regel nicht oder nicht sehr wesentlich von den analogen rezenten, da ihre Bildungszeit so wenig weit zurückliegt, daß Diagenese und Metamorphose erst wenig auf sie eingewirkt haben. Da seit dem Beginne der Quartärperiode die Grenzen zwischen den Meeren und Festländern nur verhältnismäßig geringfügige Verschiebungen erfahren haben (die wichtigsten heute verschwundenen Landbrücken bestanden zwischen Nordostsibirien und Alaska, zwischen England und dem europäi-

[1]) Den wissenschaftlichen Namen ausgestorbener Gruppen, Gattungen und Arten ist ein † vorgesetzt.

schen Kontinente, zwischen Südeuropa und Nordafrika, zwischen der Mehrzahl der asiatischen Inseln und dem asiatischen Kontinent und zwischen Neuguinea und Australien; von den heutigen Festländern waren fast nur verhältnismäßig kleine randliche Teile vom Meere bedeckt), sind uns so gut wie alle rezenten kontinentalen Facies aus dem Quartär bekannt, während wir die marinen Facies viel lückenhafter, in der Hauptsache nur in Gestalt von Flachseeabsätzen, kennen.

Manche Schichten der Tiefseegrundproben der Deutschen Südpolarexpedition lassen auf eine von der heutigen abweichende Lage der antarktischen Packeisgrenze schließen und erweisen sich damit als Absätze aus der Zeit einer der quartären Klimaschwankungen (E. Philippi, Ueber das Problem der Schichtung und über Schichtbildung am Boden der heutigen Meere. Zeitschr. der Deutschen Geologischen Gesellschaft 1908).

Infolge des periodischen Facieswechsels während der Quartärperiode besitzen mehrere Facies im Quartär eine erheblich größere Verbreitung als in der Gegenwart. Das gilt insbesondere von der Facies der Gletscherablagerungen und der Lößfacies, d. h. der Facies des in Steppengebieten vom Winde als äolischer oder echter Löß aufgehäuften oder in die stehenden und fließenden Gewässer gewehten und an deren Grunde als Seelöß oder fluviatiler oder Sandlöß abgesetzten feinsten Verwitterungsstaubes.

5. Verbreitung. Die Verbreitung der Quartärformation ist eine fast allgemeine. Auch in Gebieten, in denen in der Gegenwart fast nur Abtragung und fast keine Gesteinsbildung stattfindet, ist vielfach aus quartären Perioden glazialer oder äolischer Akkumulation eine Decke quartärer Ablagerungen vorhanden. Die größte Verbreitung und Mächtigkeit (bis zu mehreren Hunderten von Metern) besitzen quartäre Ablagerungen in den Akkumulationszonen der quartären Vereisungsgebiete und in den quartären Trockengebieten mit äolischer Sedimentbildung.

6. Gliederung. Bei der alten Gliederung des Quartärs in Diluvium und Alluvium wurden von der als Diluvium zusammengefaßten Hauptmasse der quartären Gesteinskörper die jüngsten, heute noch in Fortbildung begriffenen oder doch wenigstens unter den heutigen im wesentlichen gleichen Faciesverhältnissen gebildeten als Alluvium abgeschieden. Diese Gliederung ist nicht scharf durchzuführen, weil die Faciesverhältnisse einer wenn auch oft sehr langsamen, so doch ständigen Umgestaltung unterliegen, und führt außerdem zu einer für die verschiedenen Gebiete der Erde zeitlich verschiedenen Grenze, weil die Faciesverhältnisse in den verschiedenen Teilen der Erde sehr verschieden starke und rasche Umgestaltungen erfahren haben.

Die Ansichten darüber, was „im wesentlichen gleiche" Faciesverhältnisse sind, gehen sehr stark auseinander, so daß auch für ein und dasselbe Gebiet die Grenze zwischen Diluvium und Alluvium sehr verschieden gezogen wird. So wird die Zeit der Klimaschwankungen nach der letzten großen Eiszeit bald dem Diluvium, bald dem Alluvium zugerechnet, bald auf beide verteilt. Schon in nahe benachbarten Gebieten kann der Grad der Umgestaltung der Faciesverhältnisse in einem und demselben Zeitabschnitte ein sehr verschiedener sein. Suchen wir beispielsweise nach den zeitlichen Aequivalenten der großen baltischen Endmoränen, die als glaziale Gebilde in einem heute fern von Gletschergebieten gelegenen Gebiete allgemein noch dem Diluvium zugerechnet werden, am Südrande des nordischen Vereisungsgebietes, so können wir sie hier nur in Ablagerungen finden, die ihrer Facies nach so wenig von den rezenten abweichen und von diesen so schwer zu unterscheiden sind, daß sie tatsächlich so gut wie allgemein dem Alluvium zugerechnet werden.

Die Gliederung der quartären Ablagerungen wird dadurch ganz außerordentlich erschwert, daß uns das Quartär in der Hauptsache nur in kontinentaler Facies bekannt ist. Auf den quartären Kontinenten lagen wie auf den Kontinenten aller Zeiten Gebiete vorwiegender Gesteinsbildung und Gebiete vorwiegender Abtragung nebeneinander und diese Grenzen verschoben sich, z. B. durch Vereisungen, die in Gebieten, die bisher Abtragungsgebiete waren, mächtige Glazialablagerungen anhäuften. So kommt es, daß in verschiedenen Gebieten der quartären Kontinente recht verschiedene Abschnitte der Quartärperiode durch Ablagerungen vertreten sind. Dementsprechend können für einzelne Gebiete aufgestellte Gliederungen des Quartärs oder des Diluviums in unteres, mittleres und oberes nur örtliche Bedeutung beanspruchen. Ausdrücke wie unteres, mittleres und oberes Quartär oder Diluvium sind daher in so vielen ganz verschiedenen Bedeutungen im Gebrauche, daß es sich empfiehlt, für eine allgemeine Gliederung ganz von ihnen abzusehen.

Beispielsweise fehlen in den Exarationsgebieten der großen Vereisungen die Ablagerungen dieser Vereisungen, die in den peripheren Akkumulationsgebieten große Mächtigkeiten besitzen, während hier wiederum die glazialen Ablagerungen der kleineren Eisvorstöße aus der Zeit nach der letzten großen Eiszeit fehlen, die wir in den Exarationsgebieten der großen Eiszeiten antreffen.

Eine weitere Schwierigkeit stellt der Gliederung der Quartärformation der periodische Facieswechsel entgegen. Die periodische Wiederkehr gleicher Facies läßt häufig Ablagerungen ganz verschiedener Abschnitte der Quartärperiode, also etwa Mo-

ränen verschiedener Eiszeiten oder Lösse verschiedener Steppenperioden, nicht auf Grund der Gesteinsbeschaffenheit oder der etwa vorhandenen Fossilienführung, sondern nur auf Grund der Feststellung des Lagerungsverbandes, die oft nur durch Spezialkartierung und nicht selten auch durch diese nicht möglich ist, ermitteln. Die periodische Wiederkehr sehr ähnlicher, oft vorläufig noch nicht unterscheidbarer Floren und Faunen in ein und dasselbe Gebiet läßt, wenigstens beim derzeitigen Stande unserer Erkenntnis, die sonst so fruchtbare Methode der paläontologischen Altersbestimmung und Gliederung als wenig verwendbar, ja häufig geradezu irreführend erscheinen.

Wenn beispielsweise heute noch vielfach für Europa oder größere Teile dieses Erdteiles von einer Stufe des †Elephas antiquus Falc. oder einer solchen des †Elephas primigenius Blumenb. gesprochen wird, so beruht das lediglich auf einer unzulässigen und zu schweren Fehlern führenden Anwendung der paläontologischen Methode. Die genannten „Leitelefanten" sind zwar bezeichnend für bestimmte Faunen und damit klimatisch bedingte paläontologische Facies, aber sie sind mitsamt ihrer Begleitfauna, wie bereits völlig sichergestellt ist, in sehr verschiedenen, zeitlich zum Teil um mehr als $^3/_4$ der ganzen Quartärperiode auseinanderliegenden, aber klimatisch gleichartigen Zeitabschnitten in das Gebiet eingewandert und dann jeweils beim Eintritte für sie ungünstigen Klimas wieder abgewandert. — Schneller als die Umgestaltung der quartären Pflanzen- und Tierarten sind Veränderungen im fossil erhaltungsfähigen Kulturinventare der quartären Menschen vor sich gegangen. Daher sind diese Kulturinventarien schon vielfach zur Parallelisierung, Altersbestimmung und Gliederung quartärer Ablagerungen verwandt worden. Allein die Grundlage dafür, d. h. die sichere Einordnung der einzelnen Typen von Kulturinventarien in die auf dem Boden einer Verfolgung der Lagerungsbeziehungen der quartären Ablagerungen zueinander erwachsenen Quartärgliederungen sind noch — wenn auch keineswegs unsicher, so doch — sehr umstritten.

Gerade die periodischen Klimaschwankungen der Quartärperiode aber sind es auch, die sich zur Grundlage einer Gliederung der Quartärformation eignen — wenigstens unter der allerdings immer sicherer werdenden Annahme, daß sie auf eine die ganze Erde betreffende Ursache zurückzuführen sind. Die Zahl der in den verschiedenen quartären Vereisungsgebieten erkannten Eiszeiten und die Größe der Eisausdehnung in den einzelnen Eiszeiten zeigt trotz der Ungleichmäßigkeit der Untersuchung in den einzelnen Gebieten bereits so bemerkenswerte Uebereinstimmungen, daß in den Eiszeiten ein Ausgangspunkt für die Gliederung der Quartärperiode gegeben erscheint. Ebenso zeigen die Lößbildungen in gewissen Teilen der Randgebiete und des Umkreises der Vereisungsgebiete in ihrer Ausbildung, ihrer Gliederung und ihrer Einschaltung zwischen die einzelnen Vereisungen bedeutungsvolle Uebereinstimmungen. Das ist für die Quartärgliederung von ganz besonderer Bedeutung, weil sich die Lößablagerungen weit über die Ränder der Vereisungsgebiete ausdehnen und so für die Parallelisierung der Ablagerungen der vereist gewesenen und der nicht vereist gewesenen Gebiete und unter Umständen auch verschiedener Vereisungsgebiete (so des alpinen und des nordeuropäischen) eine wertvolle Grundlage abgeben.

Es wird jetzt mehr und mehr üblich, bei der Gliederung der Quartärformation auszugehen von dem für das bestuntersuchte Vereisungsgebiet der Erde, das Alpengebiet, von Penck und Brückner ermittelten Systeme von Klimaschwankungen. Penck und Brückner unterscheiden hier vier große, durch lange Interglazialzeiten mit gemäßigtem Klima voneinander geschiedene Eiszeiten, welche sie von der ältesten bis zur jüngsten (nach Flüssen des nördlichen Alpenvorlandes, deren Namen so gewählt wurden, daß ihre Anfangsbuchstaben in alphabetischer Reihenfolge aufeinanderfolgen) als Günz-, Mindel-, Riß- und Würm-Eiszeit und drei postglaziale oder postwürmische geringere Eisvorstöße, welche sie (in ähnlicher Weise, doch so, daß ihre Anfangsbuchstaben nach der Reihenfolge des griechischen Alphabetes aufeinanderfolgen), als Bühl-, Gschnitz- und Daun-Vorstoß bezeichnet haben. Diese Vorstöße sollten ursprünglich nur Rückzugsstadien oder Vorstöße des sich zurückziehenden Würm-Eises darstellen und nicht durch den Interglazialzeiten vergleichbare Zwischenzeiten mit gemäßigtem Klima voneinander getrennt sein, und wurden dementsprechend von Penck und Brückner im Gegensatz zu den eigentlichen „Eiszeiten" als „Stadien" bezeichnet. Es ist indessen wahrscheinlich, zum Teil sogar bereits sicher, daß die Stadien durch Zeiten gemäßigten Klimas, die sich lediglich der Größenordnung nach von den Interglazialzeiten unterscheiden, voneinander getrennt sind, so daß sie als echte, nur der Größenordnung nach abweichende, Eiszeiten, als kleine Eiszeiten erscheinen. Von mehreren Autoren wird noch ein jüngstes Tribulaun-Stadium unterschieden. Ferner mehren sich Anzeichen für kleinere, der Günz-Eiszeit vorausgegangene Eiszeiten. Die, wie E. Schumacher zuerst im Elsaß gezeigt hat, durch Vereisungsperioden voneinander getrennten verschiedenalterigen Löße sind nach Penck und Brückner in Steppenperioden entstanden, welche die großen Eiszeiten einleiteten. Andere Autoren stellen die Löß-

bildungsperioden in die Anfänge und Enden der Eiszeiten, noch andere in die Höhepunkte der Interglazialzeiten. Außer Lößbildungen aus den großen Interglazialzeiten sind auch solche aus postwürmischen Zeitabschnitten sicher nachgewiesen. Gehen also die Ansichten der Autoren über wichtige Momente der Gliederung des Quartärs des Alpengebietes noch weit auseinander, so scheint doch in den 4 großen — zum Teil auch den nachfolgenden kleineren — Eiszeiten und in der Einordnung der sehr verschieden alten Lösse zwischen die einzelnen Hauptvereisungsperioden bereits eine hinreichend gesicherte Grundlage für die Gliederung der Quartärperiode gegeben zu sein.

Im nordeuropäischen Vereisungsgebiete lassen sich 3 große Eiszeiten, welche unverkennbar Mindel, Riß und Würm entsprechen, erkennen. Auch die Parallelisierung der großen baltischen Endmoränen mit den Bühl-Moränen gewinnt immer mehr Anhänger. Die „Stadien" sind noch nicht mit der wünschenswerten Sicherheit mit den alpinen zu parallelisieren. Die Lösse ordnen sich größtenteils zwischen die Vereisungsperioden ein, wenn das auch von der Mehrzahl der hier arbeitenden Geologen noch nicht eingesehen wird; außerdem sind postwürmische Lößablagerungen so gut wie allgemein anerkannt.

Was die kleineren Vereisungsgebiete Europas betrifft, so entsprechen die in den Pyrenäen nachgewiesenen großen Eiszeiten sehr vollkommen den alpinen, während die Glazialablagerungen der übrigen Gebirge, die gewöhnlich den größten Eiszeiten (Mindel und Riß) zugeschrieben werden, sicher in der Hauptsache der Würm-Eiszeit, zum Teil wohl auch den kleinen postwürmischen Eiszeiten angehören.

Von den außereuropäischen Vereisungsgebieten sind die größten und besterforschten das nordamerikanische und das große südamerikanische. In Nordamerika lassen sich die Glazialablagerungen des Jerseyan (Nebraskan, Pre-Kansan), Kansan und Illinoian (Iowan) den Günz-, Mindel- und Riß-Ablagerungen parallelisieren, während das Wisconsin den Würm- und Bühl-Ablagerungen entsprechen dürfte. Die Lößbildungsperioden fallen hier teils zwischen große Eiszeiten (speziell für die Interglazialzeit zwischen Illinoian und Wisconsin nachgewiesen), teils in postwürmische Zeitabschnitte. In dem großen südamerikanischen Vereisungsgebiete lassen sich neben einigen „Stadien" 3 große Eiszeiten erkennen, von denen die beiden jüngeren nach den Lagerungsbeziehungen ihrer Ablagerungen zu den Gliedern der Lößablagerungen (des Pampaslehmes) mit der Riß- und der Würm-Eiszeit zu parallelisieren sind.

Die Einordnung der Ablagerungen der übrigen Glazialgebiete ist noch wenig geklärt. Ebenso bestehen über die Parallelisierung der „Stadien", wie aus dem bereits Gesagten schon teilweise hervorgeht, noch erhebliche Meinungsverschiedenheiten.

In der Erforschung der „Stadien" und überhaupt der postwürmischen Klimaschwankungen spielen floren- und faunengeschichtliche, von den rezenten Floren und Faunen ausgehende Untersuchungen eine große Rolle (vgl. besonders A. Schulz, Das Klima Deutschlands während der seit dem Beginne der Entwickelung der gegenwärtigen phanerogamen Flora und Pflanzendecke Deutschlands verflossenen Zeit, Zeitschr. der Deutschen Geolog. Ges. 1910 und A. Schulz, Die Wandlungen des Klimas Deutschlands seit der letzten Eiszeit, Abh. der Naturforsch. Ges. zu Halle a. S., N. F., Nr. 1, 1912). Die durch solche Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse werden von den Geologen gewöhnlich ignoriert.

Die Einordnung der entfernter von den Vereisungsgebieten gebildeten Ablagerungen in die auf dem Boden der Vereisungsgebiete erwachsenen Quartärgliederung ist noch recht unsicher. Die Pluvialperioden der Trockengebiete entsprechen offenbar Eiszeiten, und zwar scheinen die größten Pluvialperioden in den daraufhin am besten untersuchten Trockengebieten Aegyptens und Palästinas der Günz- und insbesondere der Mindel-Eiszeit zu entsprechen.

7. **Nutzbarkeit.** Tonige und lehmige Ablagerungen (Moränen, Schmelzwasserabsätze, Löß) und tonige, lehmige, insbesondere aus Laterit bestehende, Verwitterungsrinden und deren Umlagerungsprodukte werden zur Herstellung von Ziegeln oder Luftziegeln verwandt. Die größeren Geschiebe der Glazialablagerungen liefern da, wo diese letzteren das vorquartäre feste Gestein verhüllen, ein wichtiges Material zur Herstellung von Bau- und Pflastersteinen. Kiese und Sande, abgesetzt von Flüssen und Gletscherschmelzwässern, dienen als Wegebeschotterungsmaterial und Bausand. Quartäre Flußkiese und -sande sind die Hauptlagerstätten der Seifenmineralien (Edelsteine und Edelmetalle). Torflager liefern in vielen feuchteren Gebieten der gemäßigten Zonen Brennmaterial. Andere Bodenschätze, wie vulkanische Gesteine, Travertine, Kieselgurlager, Mergellager, zur Herstellung feinerer keramischer Erzeugnisse brauchbare Tone und viele andere sind von so geringer Verbreitung, daß sie hier nicht im einzelnen aufgezählt werden können. Die Hauptbedeutung der Quartärablagerungen für die menschliche Kultur beruht aber nicht in ihren technisch nutzbaren Ablagerungen, sondern darin, daß fast überall auf der Erde

der Boden, der die wildwachsende wie die vom Menschen angebaute Vegetation trägt und nährt, von quartären Gesteinen oder quartären Verwitterungsprodukten gebildet wird.

Literatur.[1]) **M. Blanckenhorn**, *Neues zur Geologie Palästinas und des ägyptischen Niltals. Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges. 1910.* — **T. C. Chamberlin**, *The Classification of American Glacial Deposits. Journ. of Geol. 1895.* — † **Fr. Frech** *(mit Beiträgen von* **E. Geinitz**, *Flora und Fauna des Quartärs. Lethaea geognostica, III. Teil, 2. Band, 1. Abteilung. Stuttgart 1904.* — **J. Geikie**, *The Great Ice-Age. III. Ed. London 1894.* — **Derselbe**, *The Classification of European Glacial Deposits. Journ. of Geol. 1895.* — † **E. Geinitz**, *Das Quartär Nordeuropas. Lethaea geognostica, III. Teil, 2. Band, 1. Abteilung. Stuttgart 1904.* — † **Derselbe**, *Die Eiszeit. Braunschweig 1906.* — **Frank Leverett**, *Comparison of North American and European glacial deposits. Zeitschr. für Gletscherkunde 1910.* — **A. Penck und E. Brückner**, *Die Alpen im Eiszeitalter, 3 Bände. Leipzig 1909.* — **G. Steinmann**, *Diluvium in Südamerika. Zeitschr. d. Deutsch. Geol. Ges. 1906.* — **Derselbe**, *Die Eiszeit und der vorgeschichtliche Mensch. Leipzig 1910.* — **F. Wahnschaffe**, *Die Oberflächengestaltung des norddeutschen Flachlandes. III. Aufl. Stuttgart 1909.* — † **G. F. Wright**, *The Ice-Age in North America. V. Ed. Oberlin Ohio 1911.* — *Die Veränderungen des Klimas seit dem Maximum der letzten Eiszeit. Eine Sammlung von Berichten, herausgeg. von dem Exekutivkomitee des 11. internationalen Geologenkongresses. Stockholm 1910.* — *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 1910, Heft 2 (besteht aus 11 Arbeiten über die Veränderungen des Klimas seit dem Maximum der letzten Eiszeit).*

Ew. Wüst.

Quarz

siehe den Artikel „Mineralien, Optisch wichtige Mineralien".

Quellen.

1. Definition. Als Quellen werden die Ausbisse bewegter Flüssigkeiten an der Erdoberfläche bezeichnet. Drei Arten bewegter Flüssigkeiten sind in der Erdkruste hauptsächlich vorhanden: Magma, Erdöle und Wasser. Die Ausbisse des Magmas sind vulkanische Erscheinungen und werden zumeist nicht als Quellen bezeichnet. Für die Ausbisse von Erdölen und Wasser gelten die gleichen Gesetze der äußeren Erscheinungsform und der geologischen Ursachen ihres Auftretens. Verschieden sind die Ausbisse von Wasser und Erdöl soweit die Verschiedenheit des Materials sich geltend macht, d. h. in der Bewegung, ihren chemischen Wirkungen und ebenso in der geographischen Verbreitung ihres Auftretens. Als Quellen im engeren Sinne sind die Wasserquellen zu betrachten, die hier allein behandelt werden sollen.

Geologie der Quellen.

2. Verteilung des Wassers auf und in der Erde. Die Hauptmenge des Wassers ist auf der Erde in flüssiger Form vorhanden, in der es etwa $^3/_4$ der Oberfläche als Meer bedeckt. Aber auch auf und in dem nicht vom Meere bedeckten Teile der Erdoberfläche ist flüssiges Wasser in großer Menge vorhanden. Delesse hat die Menge des allein in der festen Erdkruste befindlichen Wassers zu berechnen versucht. Er nahm an, daß in einer Tiefe von 18,5 km das Wasser in der Erdkruste nur noch in Dampfform vorhanden sein könne. In dieser Tiefe beträgt die Temperatur, mit Hilfe der geothermischen Tiefenstufe berechnet, 600°. Bei dieser Temperatur kann das Wasser unter keinem Drucke flüssig sein. Nimmt man an, daß bis zu dieser Tiefe nur durchschnittlich 5 % vom Gewichte der Gesteinsmassen aus Wasser bestände, so verhielte sich der im nicht vom Meere bedeckten Viertel der Erdkruste bis 18,5 km Tiefe vorhandene Wasservorrat von $\frac{1}{4} \cdot \frac{5}{100} \cdot 18{,}5$ zu dem im Meere mit 3,3 km mittlerer Tiefe vorhandenen von $\frac{3}{4} \cdot 1 \cdot 3{,}3$ wie 0,23 : 2,475. Die Menge des flüssigen Wassers im nicht vom Meere bedeckten Viertel der Erdoberfläche unter Ausschluß aller Flüsse und Seen wäre also gleich einem Zehntel der im Meere vorhandenen. Unter Zurechnung der unterhalb des Meeres vorhandenen Wassermenge erhielte man $^1/_2$ der im Meere be-

[1]) *Denjenigen Schriften, welche von dem von der überwältigenden Mehrzahl der Quartärgeologen vollkommen abgelehnten monoglazialistischen Standpunkte aus geschrieben sind, ist ein † vorgesetzt.*

findlichen. Ramann ist der Ansicht, daß etwa 0,05 % des Gewichtes der festen Erdrinde aus Wasser bestände und berechnet eine Wassermenge von 13 Millionen Kubikkilometern. Diese Zahl wäre ein Minimum, da wohl alle Bodenarten und Gesteine mehr als 0,05 % Wasser enthalten.

In unbewegter und in bewegter Form ist das Wasser in der Erdrinde, das Bodenwasser, vorhanden. Der unbewegte Teil ist als Bergfeuchte physikalisch, zum Teil auch chemisch gebunden. Im Verbande der Erdschichten wird von ihr nur wenig und das Wenige im Laufe langer Zeiträume abgegeben. Den zweiten, bewegten Teil bilden die Sickerwässer, die beständig ihren Ort wechseln und deren Erscheinen an der Oberfläche die Quellbildung verursacht. Sie treten in verschiedenen Formen auf. Lockere und lose Gesteine werden von ihnen vollständig durchtränkt, so daß größere Ansammlungen mit einheitlichem Verhalten stattfinden. Man spricht in diesem Falle im Sinne A. Steuers von Grundwasser. In nicht lockeren, aber durchlässigen Gesteinen sammelt sich „Schichtwasser" als besondere Form des Grundwassers an. Aber auch in undurchlässigen Gesteinen gibt es Sickerwässer, die je nach den Stellen, an denen sie angesammelt sind oder sich bewegen, als Schichtfugen-, Kluft- und Spaltwässer bezeichnet werden.

Es ergibt sich hiernach folgendes Schema der Bodenwassereinteilung:

1. Bergfeuchte (unbewegt; physikalisch, zum Teil auch chemisch gebunden);
2. Sickerwässer (bewegt; ungebunden);
   a) Grundwasser in lockeren und losen, Schichtwasser in festen durchlässigen Gesteinen (zusammen als Grundwasser im weiteren Sinne zu bezeichnen);
   b) Schichtfugen-, Kluft- und Spaltwasser (auf Schichtfugen, Klüften und Spalten in Komplexen undurchlässiger Gesteine) (zusammen kurz als Fugenwasser zu bezeichnen).

3. Herkunft der Sickerwässer. Von den Formen der Sickerwässer ist das Grundwasser wohl stets[1]) vom Tagewasser abzuleiten, die übrigen zumeist ebenfalls mit Sicherheit. Einerseits stammen sie bei den an das Meer angrenzenden Bodenschichten aus diesem, andererseits unmittelbar oder mittelbar aus der Atmosphäre. So sehr auch das Meer die Bewegung der Sickerwässer, besonders des Grundwassers beeinflußt, so ist es wenigstens in dem von Menschen bewohnten Teile der festen Erdoberfläche, der über dem Meeresspiegel liegt, als Sickerwasserlieferer von geringerer Bedeutung als die Atmosphäre. Die Menge und Erreichbarkeit des Grundwassers ist geradezu von den besonderen Eigentümlichkeiten der Atmosphäre in den verschiedenen Gegenden, d. h. vom Klima, abhängig. Ganz besonders aus dem Regen- und dem Schneefall stammt ein großer Teil der Sickerwässer. Bewiesen wird diese Abhängigkeit durch die beim Grundwasser und sehr vielen Quellen anzustellende Beobachtung, daß ihre Ergiebigkeit periodisch mit den Bewegungen der Niederschlagsmengen schwankt.

Es kann aber besonders für die Fugenwässer noch eine andere Herleitung in Betracht kommen. Die Elemente des Wassers sind wie die der Gesteine kosmischen Ursprungs. Die Untersuchungen von Moissan, Fouqué, Gautier haben gezeigt, daß vulkanische Gesteine beim Erhitzen stets gewisse Wassermengen abgeben. Es ist also auch möglich, daß aus dem magmatischen Erdinnern gewisse Wassermengen in die Erdkruste hineingeschickt werden. In gleicher Weise werden auch vielfach die Erdöle, die ebenfalls in Spuren in vulkanischen Gesteinen vorhanden sind, aus dem Magma abgeleitet. Nach den neueren Untersuchungen von A. Brun scheint jedoch oft das Wasser bei den Exhalationen tätiger Vulkane zu fehlen, während Kohlenwasserstoffe stets auftreten. Brun hat Vulkane der Canaren, von Hawaii, Java, Santorin untersucht, in deren Exhalationen er oft die Abwesenheit von Wasser konstatierte. Nur wenn es gerade geregnet hatte, führten sie Wasser. In den Dämpfen des Vesuv und des Stromboli konnte dagegen Schwertschläger hauptsächlich Wasserdampf feststellen. Selbst wenn nun stets bei vulkanischen Exhalationen Wasserdampf aufträte, so würde dennoch angesichts des überwiegenden Auftretens der Vulkane am Meere der Wasserdampf aus diesem herrühren können.

So wenig Sicheres wir auch zurzeit über die Ableitung von Bodenwässern aus dem Magma wissen, so müssen wir doch diese Möglichkeit mit in Betracht ziehen, um so mehr, als im letzten Jahrzehnt, durch E. Sueß veranlaßt, in der Quellenkunde ein besonderer Nachdruck auf das Aufsteigen magmatischer Wässer gelegt wurde. Sueß nannte die Wässer heißer aufsteigender Quellen nach Art des Karlsbader Sprudels juvenil, alle von der Tagesoberfläche stammenden mit Posepny vados. Diese Bezeichnungen haben sehr schnell Eingang in die Literatur gefunden, doch ist es außerordentlich schwierig, ja vorläufig noch kaum möglich, sichere Kriterien für die Zurechnung

[1]) Nach Volger wäre es ein Produkt der Kondensation der Grundluft, nach Mezger der Kondensation von aufsteigenden Dämpfen.?

von Sickerwässern zu den juvenilen aufzustellen.

4. Bewegung der Sickerwässer. Da wir die Quellen als die Ausbisse bewegter Flüssigkeiten definiert haben, so ist für die Frage ihrer Bildung die Bewegung der im Boden vorkommenden Wässer von großer Bedeutung. In der Bewegung weichen die beiden oben unterschiedenen Arten der Sickerwässer wesentlich voneinander ab. Das Grundwasser ist zum Teil als Strom dem bewegten Oberflächenwasser vergleichbar und hat daher einfache Bewegungsarten. Dagegen ist die Bewegung der Fugenwässer zum Teil kompliziert.

4a) Bewegung des Grundwassers. Slichter unterscheidet drei Hauptzonen des Grundwassers (i. w. S.): die ungesättigte Zone, die obere Fließzone, die tieferen Fließzonen. In der ersten Zone ist das Wasser hauptsächlich in einer Vertikalbewegung begriffen: nach abwärts, sobald ein Regenfall die Schichten über die Sättigung hinaus durchtränkt hat; nach aufwärts, infolge der Oberflächenverdunstung und der Einwirkung der Vegetation bei Regenlosigkeit. Die obere Fließzone ist zwischen dem oberen Spiegel der zusammenhängenden Wasserfläche und der ersten undurchlässigen Schicht vorhanden; die tieferen unterhalb dieser ersten undurchdringlichen Schicht, wenn mehrere vorhanden sind, ihrerseits durch undurchlässige Schichten getrennt. Alle diese Zonen sind natürlich in Stärke und Ausdehnung von klimatischen Faktoren in erster Linie abhängig. Für die Quellbildung kommen von ihnen nur die Fließzonen in Betracht.

Die Bewegung dieser Fließzonen ist von zweierlei Art. Einerseits und in der Hauptsache fließt das Grundwasser im Sinne des Fallens der undurchlässigen Schicht. Andererseits wird es aus dieser Bewegung durch das Hinströmen zu unbewegten, namentlich aber zu bewegten Oberflächenwasseransammlungen abgelenkt. Die Ablenkung kann soweit gehen, daß die Bewegung fast unabhängig vom Gefälle der undurchlässigen Schicht wird.

Stets ist die Bewegung des Grundwassers naturgemäß weit langsamer als die der Oberflächenwasser. Ihre Geschwindigkeit ist einerseits von der Porengröße der beherbergenden Schicht, andererseits von dem Betrag des Gefälles der undurchlässigen Schicht bezw. der Stärke der ablenkenden Faktoren abhängig. Durch Fließen in geneigten Schichten kann bei Störungen dieser Schichten oder Umkehrung ihres Einfallens oder Wechsel der Durchlässigkeit ein Aufstau hervorgerufen werden, der zur Aufwärtsbewegung von Grundwasser Veranlassung geben kann.

4b) Bewegung der Fugenwässer. Diese Wässer stehen manchmal mit dem Grundwasser in Verbindung, sind aber stets dort, wo dieses nahe der Oberfläche steht, von sehr geringer Bedeutung. In der Hauptsache jedoch sind sie die Sickerwasserformen solcher Gebiete, die infolge ihres undurchlässigen oder größeren Wasseransammlungen abholden Gesteinscharakters ohne Grundwasser sind. Während die Hauptansammlungen des Grundwassers in lockeren, nicht verklebten Aufschüttungen, besonders von Sand und Kies, erfolgt und auch in porösen Sand- und stark zerklüfteten Kalksteinen vorkommt, zirkulieren diese Wässer in allen mehr oder weniger harten und dichten, mit Absonderungsformen versehenen Gesteinen. Nur in den Tonen, in denen die Bergfeuchtigkeit hoch zu sein pflegt, ist zumeist weder Grund- noch Fugenwasser vorhanden.

Charakteristisch ist für diese Wässer im Gegensatze zum Grundwasser, daß nicht ein allgemeiner Zusammenhang innerhalb eines bestimmten Areals von petrographischer und geologischer Einheitlichkeit zu bestehen braucht, wie es bei dem Grundwasser der Fall ist. Es können z. B. unmittelbar benachbarte Spalten des gleichen Systems im gleichen Gesteine und Horizonte nach Temperatur und Gehalt durchaus verschiedene Wässer führen.

Schon diese Verschiedenheit der Wasserführung zeugt von einer beträchtlichen Mannigfaltigkeit der Bewegungsarten. Wir haben neben abwärts bis mehr oder weniger wagerecht auch aufwärts gerichtete Wasserläufe, die nicht nur wie bei der oberen ungesättigten Zone des Grundwassers von höchstens geringem Ausmaße sind, sondern bisweilen wie bei aufgestautem Grundwasser und stärker eine außerordentliche Bedeutung besitzen.

Die Ursachen des Aufsteigens solcher Wasseradern können verschiedene sein. Zunächst der hydrostatische Druck in Schichtkomplexen, die ihre ursprünglich horizontale Lagerung verloren haben. Alles Wasser steht unter dem Drucke des umgebenden und mit ihm in Berührung stehenden, nach Art der Druckverhältnisse in kommunizierenden Röhren. Die folgenden Schemen (nach Kayser) geben einige typische Fälle dieser Art wieder.

Figur 1 zeigt die muldenförmige Anordnung von Schichten, unter denen x wasserführend ist. Nach dem Gesetze der kommunizierenden Röhren tritt in dem niedrigeren Schenkel der Mulde ein aufwärts gerichteter Wasserstrom auf. In Figur 2 sehen wir einen Komplex geneigter Schichten durch eine Verwerfung zerrissen. Auf der Verwerfung steigt Wasser von der Berührungsstelle der Verwerfung mit der

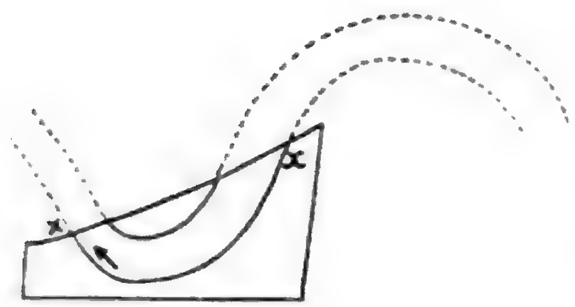


Fig. 1.

wasserführenden Schicht x nach oben. Wenn wir uns in Figur 2 mehrere Schichten als wasserführend und die Sprunghöhe der Verwerfung so groß denken, daß die unterste der wasserführenden Adern erst oberhalb der

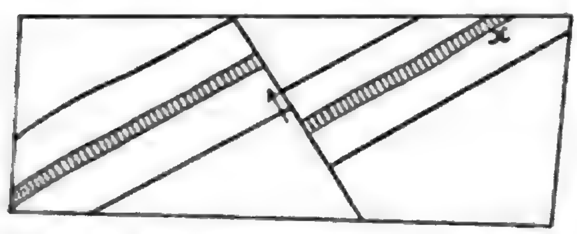


Fig. 2. x Schichtfugenwasser, × Quelle.

höchsten wasserführenden Schicht ihre Fortsetzung findet, dann hat die eine Verwerfung das Wasser mehrerer Adern gesammelt. In einem System von Zerreißungslinien führt diejenige Zerreißungs- (Verwerfungs- oder Bruch-)Linie nach Denckmann das meiste Wasser, welche alle anderen Verwerfungen wiederum zerreißt, also dem Alter der Entstehung nach die jüngste ist.

Eine andere Ursache der Aufwärtsbewegung von Wasser könnte in Aenderungen des spezifischen Gewichts zu suchen sein. Einerseits wird durch Auflösung von Mineralstoffen, Salzen und Gasen Wasser schwerer, andererseits wird es durch Erwärmung leichter. Namentlich Scherrer vermutet, daß durch solche Unterschiede im spezifischen Gewicht Aufsteigen von Wasser in Spaltensystemen, die nach Art der kommunizierenden Röhren verbunden sind, hervorgerufen wird. Es ist jedoch nicht gelungen, von der rein theoretischen Möglichkeit abgesehen, Daten aus der Natur über derartige Auftriebe zu erlangen.

Eine stärkere Erwärmung allein könnte in Spalten oder Röhren, die mit Wasser gefüllt sind, Auftriebserscheinungen hervorrufen, wobei neben dem Aufsteigen des erwärmten ein Herabsinken des kalten Wassers stattfinden müßte. Erst wenn die Temperatur am Grunde so hoch ist, daß sich dort Dampfblasen entwickeln oder wenn Dampfblasen in das Wasser eintreten, wird man stärkeres Hochströmen erwarten können.

Das Aufsteigen von Wasser unter dem Einflusse von Gas- und Dampfblasen ist vielfach Gegenstand des Studiums gewesen. Besonders einfach scheinen die Verhältnisse bei den Sauerwässern oder Säuerlingen zu liegen, die Kohlensäuregas führen. Es sind verschiedene Erklärungen möglich, die nachstehend zum Teil nach Delkeskamp besprochen werden. G. Bischof war der Ansicht, daß die Kohlensäuerlinge ursprünglich nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren aufsteigende Wässer gewesen seien, zu denen von der Seite her Kohlensäure getreten wäre. Diese Ansicht Bischofs hat lange Zeit die Theorie beherrscht. Aber in der Praxis war es, worauf B. M. Lersch hinwies, in den meisten Fällen unmöglich, die beiden Schenkel der kommunizierenden Röhren zu konstruieren. Namentlich H. Henrich hat auf besondere Eigentümlichkeiten der Säuerlinge aufmerksam gemacht, die der Annahme Bischofs widerstreiten. Nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren drückt die Wassersäule eines höheren Schenkels die des niedrigeren herauf. Der niedrigere müßte also künstlich erhöht werden können, ohne das Aufsteigen bis zu einem gewissen Grade zu verhindern. Bei nur geringen Erhöhungen hören jedoch die Säuerlinge auf zu fließen. Ferner liefern sie, wie besonders von Knett am Karlsbader Sprudel gezeigt wurde, bei niedrigem Luftdruck unter sonst gleichen Umständen mehr Wasser als bei hohem. Wenn hier zwei Schenkel kommunizierender Röhren vorlägen, müßte doch der Luftdruck auf beide gleichmäßig wirken. Auf die Unmöglichkeit, die intermittierend austretenden Säuerlinge mit ihrem besonderen Kohlensäurereichtum allein nach hydrostatischem Prinzip zu erklären, weist Haas hin. Hier scheint eine auftreibende Kraft der Kohlensäure zu walten. Zum Vergleiche wird hier vielfach auf das Aufsteigen von Flüssigkeiten beim Oeffnen von Flaschen, die Kohlensäure unter Druck eingepreßt enthalten, verwiesen. Aber dieses Aufsteigen geschieht nur, solange die unter hohem Drucke stehende Kohlensäure plötzlich entweicht. Unter diesem Drucke hatte die Flüssigkeit ein Vielfaches ihres Volumens an Kohlensäure aufnehmen können. Beim Oeffnen der Flasche verdrängt die Kohlensäure soviel in Schaum verwandelte Flüssigkeit, als sie selbst Raum einnimmt, da zwei Körper gleichzeitig nicht denselben Raum einnehmen können. Der Vergleich mit dieser Kohlensäureflasche paßt nicht, da der Druck der Kohlensäure in Säuerlingen außerordentlich gering ist. Besser paßt ein Vergleich mit einer Gasblase, die man durch eine mit

Wasser gefüllte, oben offene Röhre treten läßt. Beim Eintritt in die Röhre verdrängt die Gasblase nach oben soviel Wasser, als sie selbst Raum einnimmt. Beim Aufsteigen der Blase sinkt aber das Wasser an ihrem Mantel herunter und sammelt sich unter der Blase an. Ein eigentliches Aufpressen oder Hochreißen während des Aufsteigens tritt jedoch nicht ein.

Diesem Experimente entspricht die Theorie des Aufsteigens der Säuerlinge von Henrich, die den tatsächlichen Verhältnissen besser gerecht wird, als die von Bischof. Henrich nimmt nicht zwei, sondern eine Röhre oder Spalte an, die ihr Wasser durch Seiten- oder Haarspalten erhält, welche nicht höher zu reichen brauchen als die Hauptspalte. Auf Grund mathematischer Ableitungen, namentlich mit Berücksichtigung der Luftdruckerscheinungen, und gestützt durch zahlreiche Experimente und Beobachtungen fand Henrich das Aufsteigen der Säuerlinge durch Kohlensäurewirkung in der Weise erklärlich, daß die in der Spalte oder Röhre frei werdende Kohlensäure soviel Wasser verdrängt, als sie selbst Raum einnimmt. Das verdrängte Wasser wird immer wieder aus den Seitenspalten ersetzt. Durch das Aufsteigen der Gasblasen an sich wird dagegen keine Aufwärtsbewegung des Wassers hervorgerufen. Das Gas kann nur in das Wasser eintreten, wenn sein Druck den von der Wassersäule ausgeübten übertrifft. Intermittierendes Aufsteigen findet statt, wenn besonders starke Kohlensäureblasen in das Wasser eintreten. Oder aber es können in gebogenen oder seitlich ausgebuchteten Röhren Gasansammlungen stattfinden, die beim Auftreten von Ueberdruck die überstehende Wassersäule hochschleudern.

Was hier für die Kohlensäure abgeleitet ist, gilt naturgemäß ebenso für andere Gase, besonders für Wasserdampf, untergeordnet auch für Kohlenwasserstoffe und Schwefelwasserstoff. Wasserdampf, der Aufsteigen hervorruft, kann eventuell erst im Wasser entstehen.

5. Quellbildung. Quellen treten auf, sobald die bewegten Sickerwässer die Erdoberfläche erreichen. Die zumeist nach H. B. Woodward gezeichneten Figuren geben eine Anzahl von Schemen für Wasseraustritte wieder, die einfache Fälle darstellen. Im speziellen Teile sind besondere Fälle behandelt, die zum Teil als Komplikationen der hier betrachteten einfachen aufgefaßt werden können.

Figur 3 zeigt eine einfache Grundwasserquelle. In einer lockeren Schicht B sammelt sich auf geneigter undurchlässiger Schicht A Grundwasser, das entsprechend der Schichtneigung abwärts fließt und am Gehänge bei x als Quelle auftritt. Es kann nur oberirdisches Wasser in Betracht kommen. Die Ergiebigkeit der Quelle ist einerseits von klimatischen Faktoren, namentlich vom Regen- und Schneefall, abhängig, andererseits von der vegetabilischen Bedeckung von B. Wenn B bewaldet ist, erreicht nur

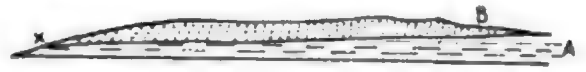


Fig. 3. Einfache Grundwasserquelle x.

ein Bruchteil, etwa ein Drittel des auffallenden Wassers den Erdboden und kann in diesen eintreten. Ist B unbewaldet, so erreicht die ganze Regenmenge den Boden. — In regenarmen Gebieten liegt das spärliche Grundwasser tief. Tritt ein Fluß von undurchlässigem Gestein auf durchlässiges, lockeres, so vermindert sich seine Wassermenge, da sie sich dem Grundwasser beigesellt. Schließlich können die Flüsse versiegen, um bei entsprechendem Gefälle der Oberfläche weiter abwärts als Grundwasserquelle wieder aufzutreten. So werden Grundwasserquellen an der Küste von Deutsch-Südwestafrika als die Ausbisse der im Binnenlande versiegten Flüsse gedeutet. — Falls nicht nur an einem Punkte auf undurchlässigem Gesteine eine Quelle auftritt, sondern eine ganze Anzahl in einer Reihe nebeneinander, so haben wir einen Quellhorizont. — Hat ein Tal den durchlässigen Gesteinskomplex bis auf das undurchlässige Liegende, dieses selbst aber nicht weiter angeschnitten, so tritt im Grunde des Tales eine Talquelle zutage.

Aber nicht nur im Sinne der Schichtenneigung treten Grundwasserquellen auf, sondern, falls eine durchlässige Schicht von einem Abhange im entgegengesetzten Sinne geschnitten wird (Fig. 4), so kann die durchlässige Schicht sich so mit Wasser anfüllen, daß es bei x überfließt. Der Grundwasserhorizont kann völlig mit Wasser angefüllt sein, so daß (vergl. Figur 5) nach beiden Seiten ein Ueberfließen des Grundwassers eintritt. Bei solchen Quellbildungen können



Fig. 4. Ueberfallquelle.

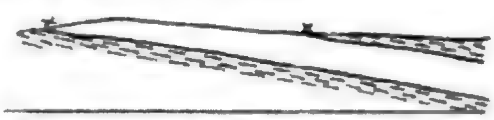


Fig. 5. Schichtwasserquellen an Tonen im Liegenden (Ueberfallquelle) und Hangenden.

zwischen den Austrittspunkten nicht unbeträchtliche Höhenunterschiede herrschen. Bei den tiefer gelegenen werden die größeren Wassermengen austreten müssen. Figur 6

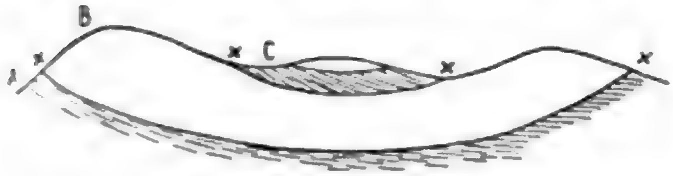


Fig. 6. Verdoppelung von 5.

zeigt das Profil der Figur 5 in doppelseitiger Ausbildung. Die durchlässige Schicht B ist muldenförmig gebogen und von undurchlässigen Schichten A und C unter- bezw. überlagert. Es ergeben sich so vier Quellen, von denen links die auf A austretende, rechts die unter C austretende wasserreicher sind. In der Mitte der Mulde steht das Wasser der durchlässigen Schicht unter dem Druck der Wassersäulen in den beiden Schenkeln. Wird die Schicht B von oben her angebohrt, so steigt das Wasser im Bohrloche hoch: es ist ein „artesischer Brunnen" entstanden.

Eine häufige Erscheinung, die sowohl bei Grundwasser- wie bei Fugenwasserquellen auftritt, ist die Verschüttung der eigentlichen Quellöffnung, so daß das Wasser erst, wie Figur 7 zeigt, weiter abwärts am Gehänge aus dem Schutt heraustritt.

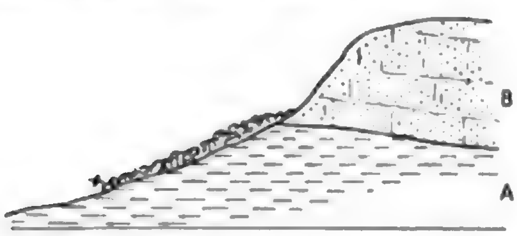


Fig. 7. Durch Schutt verlegte Quelle.

Schichtfugen-, Kluft- und Spaltwässer ergeben Quellen, die die entsprechenden Bezeichnungen führen. Die Quellen aus absteigenden Wässern dieser Gruppe sind ihrem Vorkommen nach so einfach zu erklären, daß es einer besonderen Darstellung dieser Verhältnisse nicht bedarf. In Figur 8

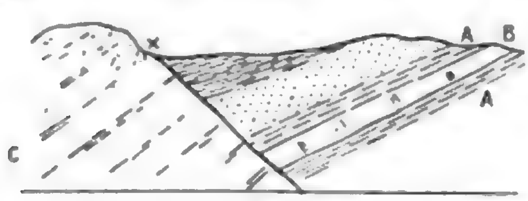


Fig. 8. Aufsteigende Verwerfungsquelle.

ist durch x der Austritt einer Spalt- bezw. Verwerfungsquelle markiert, die nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren das Wasser zutage fördert, das in der zwischen den undurchlässigen Schichten A liegenden klüftigen Schicht B herabgesunken ist. Auch Figur 1 S. 9 zeigt bei x einer Quelle aufsteigenden Wassers in einem gebogenen Schichtensystem.

Für die Quellen intermittierend aufsteigender Wässer gilt das im vorigen Kapitel über das Aufsteigen von Fugenwässern Gesagte. E. Sueß nannte diese Quellen die pulsierenden. Er unterschied zwei Arten solcher pulsierender Quellen: einerseits die in einem mehr oder minder regelmäßigen Rhythmus erfolgenden Ausbrüche heißen Wassers, die Geysir- oder Siedequellen, die infolge von Wasserdampfbildung hochsteigen; andererseits die Sprudelquellen nach Art der Karlsbader, bei denen sich Kohlensäure solange in Hohlräumen ansammelt, bis der Druck das Wasser nach oben treibt. Diese pulsierenden Quellen stehen nicht unter hydrostatischem Druck, da dessen Merkmal die Gleichförmigkeit ist. Eine andere Art von intermittierenden oder periodischen Quellen (Fig. 9) tritt

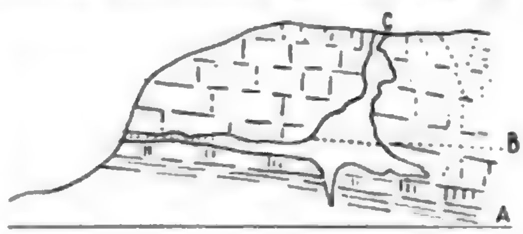


Fig. 9. Intermittierende Karstquelle.

in Karstgebieten auf (deren Wasserführung an dieser Stelle nicht ausführlich zu behandeln ist). Wenn das Karstwasser eine Höhle bis zur Linie B angefüllt hat, so tritt aus dem Höhleneingang eine Quelle heraus, die andauert bis der Wasserspiegel in der Höhle unter den Höhleneingang gesunken ist.

6. Geologische Beschreibung einiger Quellgebiete. **6a)** Die Schichtwasserquellen der Hilsmulde (Fig. 10). Ein an Schichtwasserquellen reiches Gebiet ist die Hilsmulde, südlich von Hannover, deren einfacher geologischer Bau auch einfache, leicht zu übersehende hydrologische Verhältnisse geschaffen hat. Die Karte (nach der geologischen Spezialkarte gezeichnet) gibt denjenigen inneren, etwas exzentrisch in der ganzen Mulde gelegenen Teil wieder, der aus den Gesteinen der marinen unteren Kreide besteht. Diese setzen sich aus Neocomton, Hilssandstein und Flammenmergel zusammen, welche Schichten von allen Seiten gegen die Mitte der Mulde einfallen. Die höchsten Erhebungen der Mulde werden von

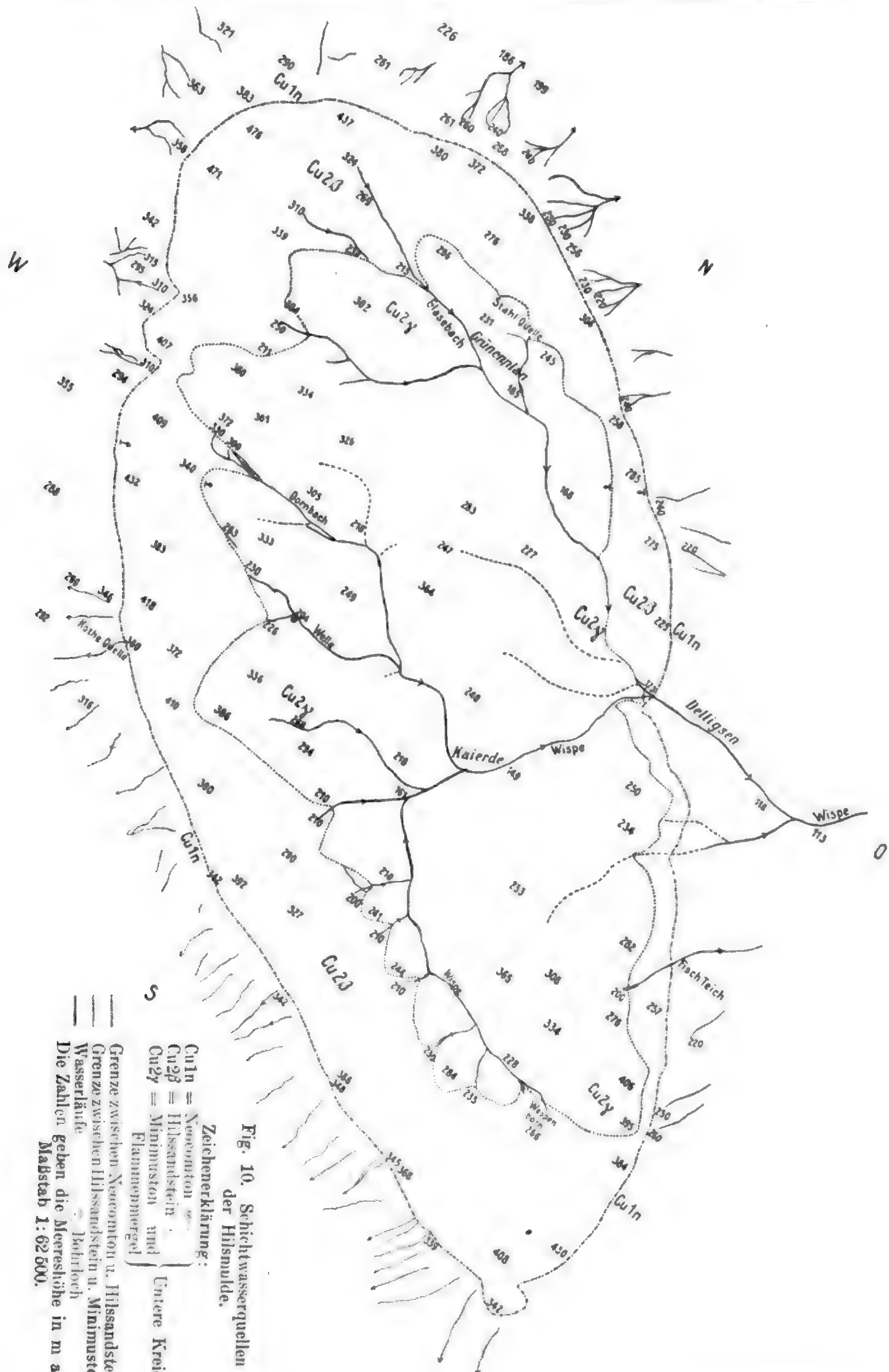


Fig. 10. Schichtwasserquellen der Hilsmulde.

Zeichenerklärung:

Cu1n = Neocomton
Cu2β = Hilssandstein
Cu2γ = Minimuston und Flammenmergel } Untere Kreide

Grenze zwischen Neocomton u. Hilssandstein
Grenze zwischen Hilssandstein u. Minimuston
Wasserläufe · Bohrloch
Die Zahlen geben die Meereshöhe in m an.
Maßstab 1: 62 500.

dem harten Hilssandstein gebildet, der auf der ganzen Westseite einen langgestreckten, nur wenig unterbrochenen, dicht bewaldeten Kamm bildet. Die Mächtigkeit des Sandsteines beträgt 80 m. Er wird von Tonen unter- und von Tonen und sandigen bis kieseligen Mergeln überlagert. Liegendes wie Hangendes sind wasserundurchlässig, während der durchlässige Sandstein selbst infolge seiner Faltung ein Wasserreservoir bildet.

Im ganzen liegen in der Hilsmulde Verhältnisse vor, wie sie in dem Schema Figur 6 S. 11 gegeben wurden. Sowohl am Liegenden wie am Hangenden des Hilssandsteins treten Quellen auf. In großer Zahl fließen am Liegenden schwache Ueberfallquellen aus dem Sandstein heraus. Oft aber scheinen sie auf der Karte nicht unmittelbar den Sandstein zu verlassen, sondern den darunterliegenden Ton oder gar erst die Schichten der nächst tieferen Formation. Aber dieser Eindruck entsteht lediglich infolge der starken Schuttbedeckung der Quellen, die auch auf der geologischen Spezialkarte eingetragen ist.

Ergiebiger als die Ueberfallquellen am Liegenden sind die Quellen, die am hangenden Minimuston im Innern der Mulde auftreten. Ihr Niveau liegt zum Teil mehr als 100 m tiefer als das der nächstgelegenen Quellen am Liegenden. Sie führen dauernd Wasser, das die Bäche (Wispe, Welle, Dorn- und Glasebach) bildet, die die Hilsmulde durchqueren und zur Wispe vereinigt verlassen.

Unterhalb des Flammenmergels steht das Grundwasser unter dem hydrostatischen Druck der Wassersäulen in den Hilssandsteinschenkeln. Die Ortschaften der Hilsmulde, z. B. Grünenplan, erhalten ihr Wasser aus Brunnen, in denen es nicht ruhig steht oder heraufgepumpt zu werden braucht, sondern infolge des darauf lastenden Wasserdruckes von selbst heraufsteigt: aus artesischen Brunnen. Ein Bohrloch, das unweit der Quelle des Wellebaches angesetzt wurde, brachte ebenfalls aus Sandstein ein starkes artesisches Wasser herauf.

6b) Erdfallquellen am Ostabhange des Hainich (Fig. 11). Bei den Städten Mühlhausen und Langensalza in Thüringen treten am Ostabhange des Muschelkalkzuges im Keuper Quellen auf, die sich durch hohen Gips- und Salzgehalt auszeichnen. Die Tonplatten des oberen Muschelkalkes fallen flach unter die Schichten des unteren Keupers ein, die ihrerseits von denen des mittleren Keupers überlagert werden. Die auf der Karte Figur 11 angegebenen Quellen, in der Nähe der Städte Mühlhausen, Langensalza und der Ortschaften Ober-Dorla, Langula, Weberstedt u. a. kommen aus Erdfällen. Im Januar 1901 ist die Entstehung einer solchen Quelle beobachtet worden. E. Kaiser beschreibt den Vorgang wie folgt: „Im Januar 1901 bildete sich... ein Erdfall, der kurze Zeit nach seiner Entstehung nur teilweise mit Wasser gefüllt war, das dann in den letzten Tagen des Januar immer höher stieg, allmählich zum Ueberfließen kam und in der Folgezeit mit mächtigem Schwalle nach dem Thomasteich herabstürzte. An eine elliptische Oeffnung von 8,5:14 m Durchmesser schließen sich nach unten senkrecht abfallende Wände, an

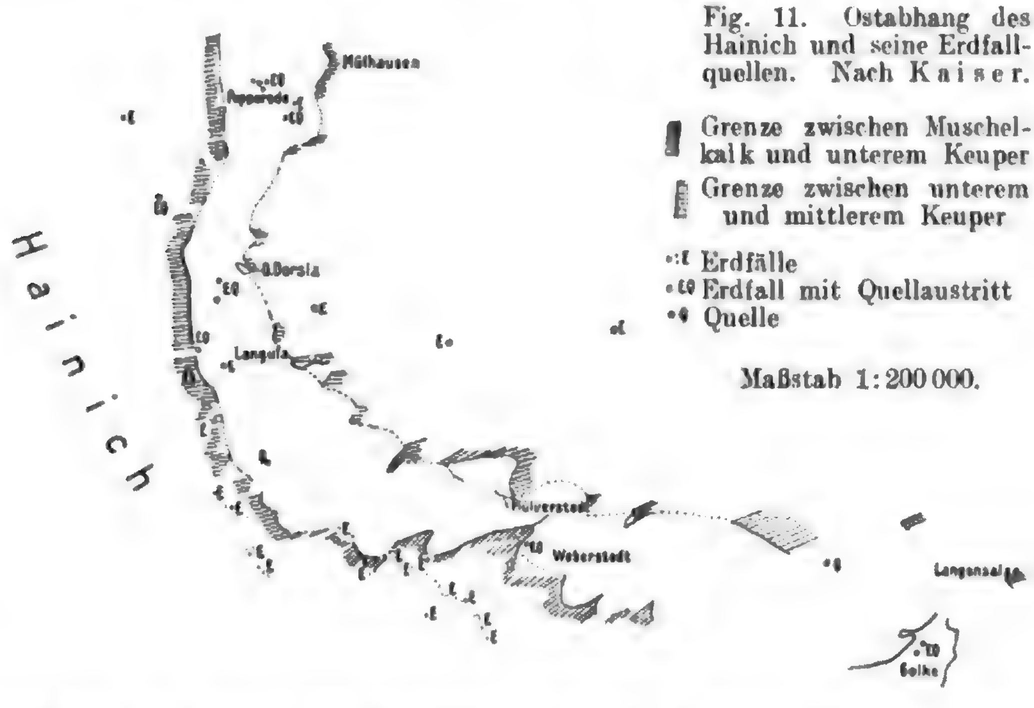


Fig. 11. Ostabhang des Hainich und seine Erdfallquellen. Nach Kaiser.

Grenze zwischen Muschelkalk und unterem Keuper
Grenze zwischen unterem und mittlerem Keuper
Erdfälle
Erdfall mit Quellaustritt
Quelle

Maßstab 1:200 000.

denen man zu den meisten Zeiten das Ausstreichen der Gesteinsschichten beobachten kann. Zu Zeiten ist das Wasser bis auf etwa 18 m durchsichtig, öfter aber auch etwas milchig trübe. Die Farbe ist tiefblau mit einem Stich ins Grünliche. Die äußere Form der Quelle hat sich seit ihrem Bestehen bis zum ..... 29. April 1902, also in $1^1/_4$ Jahren, nicht geändert. Es wurde eine Tiefe des Quellbeckens von 56 m gelotet." Längere Zeit hindurch wurden die Wassermengen, die der Quelle entströmten, gemessen. Die nachfolgende Tabelle gibt nach Kaiser Aufschluß hierüber.

Datum	cbm täglich
8. 2. 01	22000
3. 01	4000 bis 4800
4. 01	5800
5. 01	6400
6. 01	4800
6. 7. 01	2900
15. 7. 01	2200
22. 7. 01	1750
7. 8. 01	1040
17. 8. 01	371

Am 17. 8. wurde der Abflußgraben 20 cm tiefer gelegt, am 4. 9. um 50 cm.

4. 9. 01	1000

Datum	cbm täglich
27. 9. 01	371
14. 10. 01	371
17. 10. 01	690

Am 5. 11. 01 war der Wasserspiegel um 10 cm unter die Sohle des Abflußgrabens gesunken. Am 21. 11. stand der Wasserspiegel 30 cm unter der Sohle des Abflußgrabens.

29. 11. 01	371
6. 12. 01	1700
13. 12. 01	2900
20. 12. 01	3300
10. 1. 02	5000
20. I. 02	5500

Datum	cbm täglich
4. 3. 02	6400
4. 4. 02	7000
17. 4. 02	7900
12. 5. 02	7900
13. 6. 02	8200
26. 6. 02	7300
10. 7. 02	6700
2. 8. 02	4500
29. 8. 02	2900
20. 9. 02	1700
10. 10. 02	1000
17. 10. 02	1000
31. 10. 02	371

Am 8. 11. 02 stand der Wasserspiegel 10 cm unter der Sohle des Abflußgrabens, 27. 11. 28 cm. Der Abfluß wurde um 4,68 m gesenkt; die Quelle lieferte dann 31 600 cbm täglich.

Das völlige Ausbleiben der Quelle im November beider Beobachtungsjahre führte Kaiser zum Teil auf die geringeren Niederschlagsmengen im Sommer zurück, deren Wirkung sich erst nach einiger Zeit äußert. Das Maximum liegt in beiden Jahren im Mai bis Juni. Der stärkste Niederschlag findet nach Hellmann (zitiert von Kaiser) im Juli statt — aber wohl in Form von Gewitterregen. Nicht dieser schnell abfließende Niederschlag kann jedoch für die Quellbildung in Betracht kommen, sondern der zwar etwas geringere, aber weniger verdunstende und tiefer eindringende des Winters.

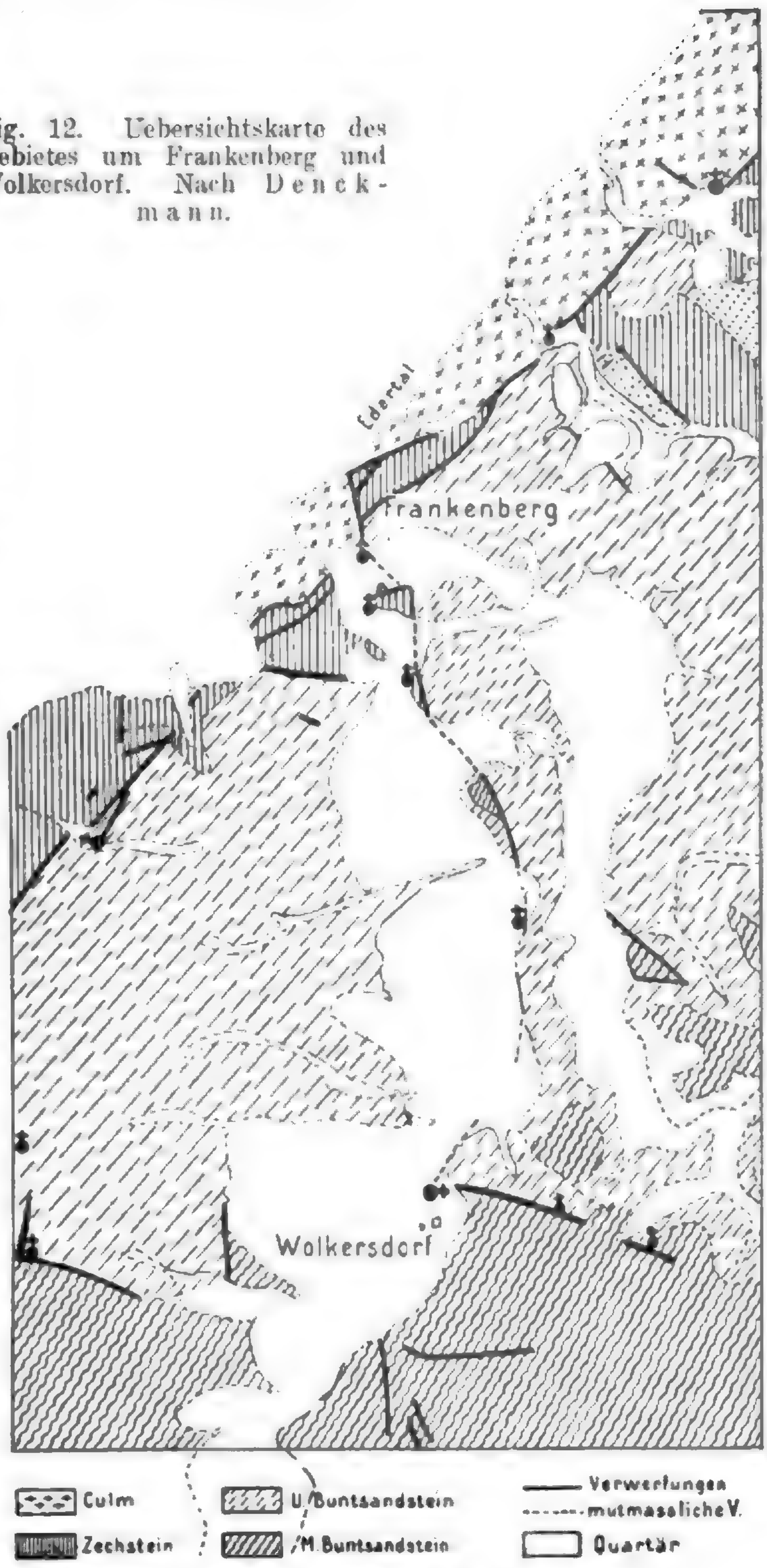
Das Entstehen der Erdfälle wird auf Auslaugungen der Gips- und Salzlager des mittleren Muschelkalkes zurückgeführt. Auf diese weist auch der Gips- und Salzgehalt des Wassers hin. Die Karte zeigt, daß die Erdfälle sich zu Reihen anordnen lassen, die keinen geradlinigen Verlauf haben. Die Reihen sind einander ungefähr parallel. Die für die Quellen wichtigste ist die Reihe Golken-Popperode. Diese Reihe entspricht einer Zone intensiver Störung der Schichten, die durch eine größere Zahl von nahe nebeneinander liegenden, parallelen Sprüngen zerrüttet sind. Diese Sprünge haben aber eine so geringe Sprunghöhe, daß sie nicht als eigentliche tektonische Störungen, sondern nur als starke Klüfte aufgefaßt werden können. Die Störungszone ist also in Wahrheit eine Zone intensiver Zerklüftung, auf der die Wässer infolge hydrostatischen Druckes aufgestiegen sind. Wir haben also in diesen Erdfallquellen nach Kaiser Beispiele von Kluftquellen.

6c) Die Verwerfungsquellen von Frankenberg (Fig. 12). Von Denckmann ist aus der Gegend von Frankenberg in Hessen eine Anzahl bemerkenswerter Verwerfungsquellen beschrieben worden, die zum Teil auf den großen östlichen Randverwerfungen des Rheinischen Schiefergebirges auftritt. Figur 12 zeigt diese südwest-nordöstlich streichenden Brüche, die die Culmformation neben den Zechstein bezw. den unteren Buntsandstein legen, die Randverwerfungen, die ein staffelförmiges Absinken des Buntsandsteingeländes erkennen lassen. Ueberall, wo diese Randverwerfungen von Tälern geschnitten werden, die auf der Figur durch die Quartärsignatur angegeben sind, finden sich Quellen, welche bei normaler Lage stets stark sind und auch in den trockensten Jahren keine merkliche Abnahme der von ihnen gelieferten Wassermenge zeigen. Die Randverwerfungen gehören zu den jüngsten des Gebietes. Auf ihnen sammeln sich die Gewässer, die auf den von ihnen geschnittenen Schichtfugen, Klüften und älteren Störungen zirkulieren. Hier kommt noch besonders in Betracht, daß die infolge ihrer starken tektonischen Zerrüttung von zahlreichen zirkulierenden Wasseradern durchsetzten Gesteine des Schie-

fergebirges gegen die einige 100 m mächtigen Schichten des unteren Buntsandsteins angrenzen, die vermöge ihrer Ton- und Schieferton-lagen wenig durchlässig sind und daher eine Art natürlicher Staumauer um die Niederschlagsgebiete und Wassersammler bilden.

Aber die Karte zeigt auf der nord-südlich gerichteten Störungslinie Frankenberg-Wolkersdorf noch mehrere starke Quellen, die ihr Wasser nicht aus den Niederschlagsmengen des Schiefergebirges zu beziehen scheinen, da sie im Buntsandsteingebiete liegen. Auch diese Quellen werden durch Perioden großer Trockenheit nicht sichtbar beeinflußt. Zum Teil liegen sie an solchen Stellen, die eine Verwerfung der durchlässigen Gesteine des mittleren Buntsandsteins gegen die weniger durchlässigen des unteren zeigen. Speziell bei Wolkersdorf trifft auf die nord-südlich streichende jüngste Verwerfungslinie dieses Gebietes eine ältere südost-nordwestlich streichende, die ihrerseits wieder Quellen führt. Aber diese sind wesentlich schwächer als die Wolkersdorfer, die wohl einen Teil der Wässer dieser Querverwerfung gesammelt haben dürfte.

Fig. 12. Uebersichtskarte des Gebietes um Frankenberg und Wolkersdorf. Nach Denckmann.



Maßstab ca. 1:67000.

6d) Die Barrierequellen der Pader (Fig. 13). Mitten in der Stadt Paderborn entspringen dicht nebeneinander viele 100 Quellen, deren Wässer, zur Pader vereinigt, die Stadt in einem ansehnlichen Flusse verlassen. H. Stille hat diese Quellen einer ausgezeichneten geologischen Untersuchung unterzogen, aus der nachstehend die wichtigsten Daten wiedergegeben werden.

Die Paderquellen gehören zu dem Gürtel von Quellen, die bei den Städten Lippspringe, Paderborn, Upspringe, Gesecke, Erwitte, Soest, Werl usw. auftreten und den Nordrand des westfälischen Plänergebietes gegen die angrenzende Diluvialebene begleiten. Speziell im Osten und Südosten von Paderborn bildet der Pläner eine allmählich von 120 m bis über 300 m Meereshöhe ansteigende, von mehreren Wasserläufen in zum Teil tief eingesenkten Tälern zerschnittene Hochfläche, die sich im Osten bis an das nordsüdlich streichende Eggegebirge erstreckt, von welchem sie sich jedoch deutlich abhebt. Die Trias- und Jurabildungen der Egge werden im Westen dieses Gebirges von den westlich einfallenden

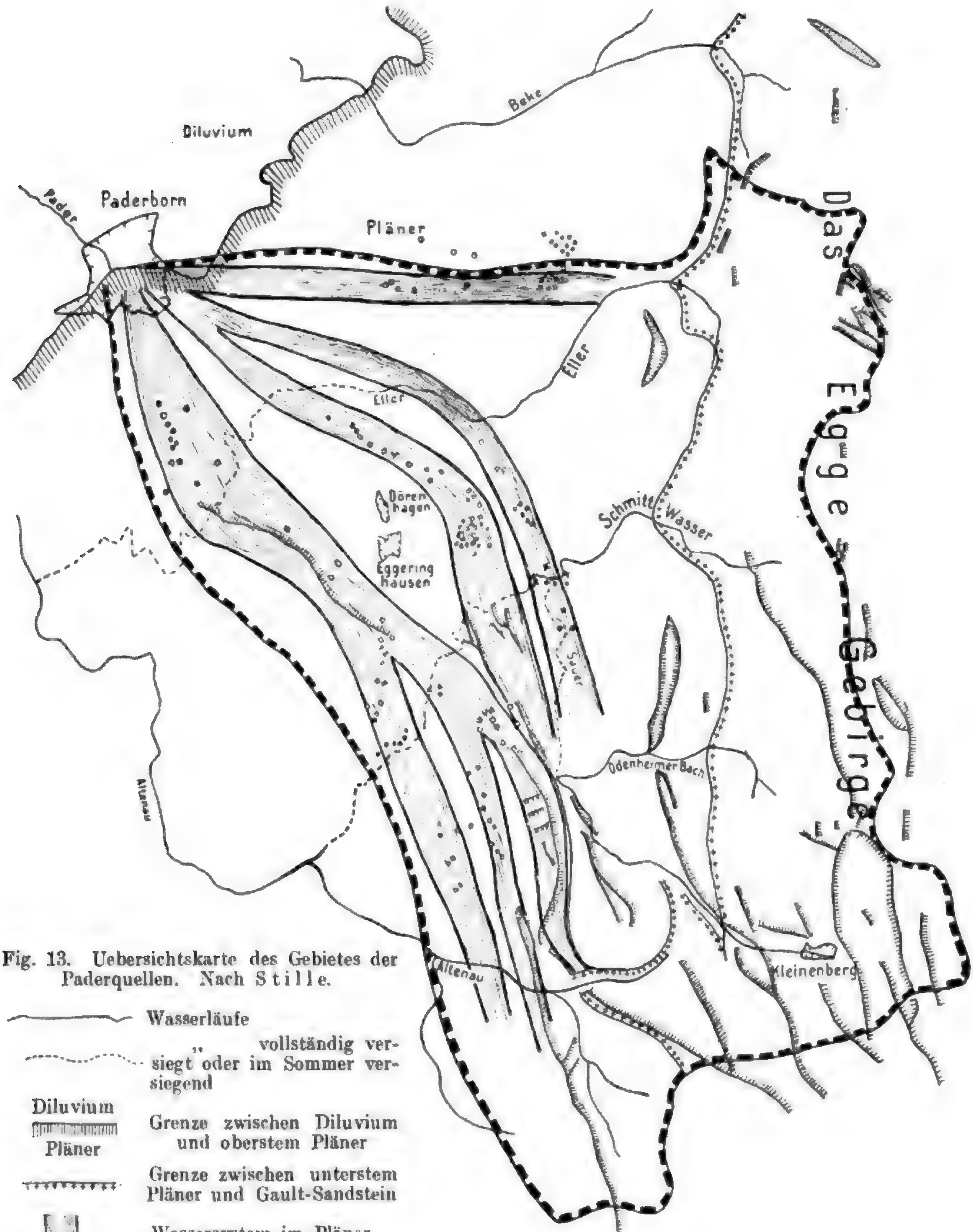


Fig. 13. Uebersichtskarte des Gebietes der Paderquellen. Nach S t i l l e.

Wasserläufe

" vollständig versiegt oder im Sommer versiegend

Diluvium / Pläner — Grenze zwischen Diluvium und oberstem Pläner

Grenze zwischen unterstem Pläner und Gault-Sandstein

Wassersystem im Pläner

Erdfälle

Temporäre } Quelle im Pläner
Ständige

Grenze des Wassergebietes der Pader

Maßstab 1:150000.

Sandsteinen des Neocom und Gault bedeckt. Diese werden von den nach Westen bis Nordwesten einfallenden Plänerbildungen des Cenoman und Turon überlagert, über denen bei Paderborn die vom Diluvium bedeckten grauen tonigen Mergel des Senon folgen. Unterbrochen werden die Pläner sowohl im Cenoman wie im Turon von Mergelbänken und Mergelschichten.

Die Lagerung der Kreideschichten ist im ganzen regelmäßig. Modifiziert werden die Lagerungsverhältnisse durch eine Reihe tektonischer Störungen, die am stärksten im südöstlichen Teile des Kreidegebietes ausgebildet sind. Doch sind die Störungen der Kreide in Zahl und Sprunghöhe nur die „seitlichen Abklänge" der größeren tektonischen Störungen in der Triaslandschaft weiter östlich. Bezeichnenderweise sind sie im Westen auf den höheren Turonschichten in wesentlich geringerer Zahl nachweisbar als auf den Cenomanplänern.

Die offenen Wasserläufe, die dieses Gebiet durchziehen, kommen von der Egge her, deren Kamm die Wasserscheide zwischen Rhein und Weser bildet. Oberirdisch wird das ganze Wassergebiet der Pader von der Altenau mit ihren Nebenbächen entwässert. In strengem Gegensatz hierzu vollzieht sich die unterirdische Entwässerung, die nicht wie die oberirdische hauptsächlich nach Südwesten, sondern nach Nordwesten verläuft. Die unterirdische folgt damit mehr dem Schichtfallen, dagegen die oberirdische einer alten Entwässerungsrichtung, die, nach den starken, jetzt zum Teil tief eingeschnittenen Mäandern zu urteilen, früher in einem im Vergleich zum heutigen wesentlich flacheren Gelände vor sich ging.

Der Gegensatz der beiden Entwässerungsrichtungen ist durch die besonderen petrographischen Eigentümlichkeiten des Pläners ermöglicht. Seine Widerstandsfähigkeit gegen die Einflüsse der Verwitterung bedingt das Herausbilden von Terrainkanten und Tafelbergen. Daneben ist aber der an sich wasserundurchlässige Pläner so stark zerklüftet, daß das Wasser in ihm sich fast wie in losem, schüttigem Material in Form eines Grundwasserstroms sammeln und auf der undurchlässigen Grundlage nach Art eines solchen fließen kann. Außer von der starken Zerklüftung ist der verkarstete Plänerkalk von Höhlungen durchzogen, durch deren Einsturz oberirdisch zahlreiche Erdfälle entstanden sind. Höhleneingänge sind vielfach seitwärts unter den Uferböschungen der Bachläufe, gelegentlich auch inmitten dieser vorhanden.

Alle die Wasserläufe des Plänergebietes zeichnen sich durch bemerkenswerte Wasserverluste in ihrem Laufe aus. Bei der Beke konnten in einem heißen Sommer nach zweimonatiger Trockenheit Messungen der Wassermengen vorgenommen werden. Unweit ihres Ursprunges durchflossen das Bachbett 70 cbm in der Minute. Etwa 4 km weiter abwärts noch etwa 30, 1300 m weiter abwärts nur 10, 160 m abwärts 6, 120 m abwärts 4 cbm. Der Ellerbach verschwindet zumeist vollständig in Höhleneingängen, nur bei Hochwasser führt sein Bett die Fluten bis zur Einmündung in die Altenau. Der Schmittbach ist, bevor er in das Plänergebiet gelangt, so wasserreich, daß er Mühlen zu treiben vermag. Nicht weit von seinem Eintritt in das Plänergebiet wird sein Wasser „bis auf den letzten Tropfen" von Höhlenlöchern verschluckt. Kurz vor seiner Vereinigung mit der Sauer treten eine starke ständige und mehrere temporäre Quellen auf, die, wie durch Färbungsversuche nachgewiesen wurde, das oberhalb verschluckte Wasser des Schmittbaches wieder an die Tagesoberfläche bringen. Die 250 m Entfernung von der Schwinde werden in $^3/_4$ bis $1^1/_4$ Stunde durchflossen. Der Odenheimer Bach, der früher einmal in südwestlicher Richtung direkt die Altenau erreichte, treibt ebenfalls im Oberlaufe Mühlen, um kurz vor dem Eintritt in die Sauer, die nach Nordwesten fließt und eine jüngere Entwässerungsrichtung als die südwestlich gerichteten darstellt und als solche zum Teil keine Mäander und ein weniger tief eingeschnittenes Tal als die weiter nördlich gelegenen südwestlich gerichteten Bachläufe aufweist, vollständig zu versiegen. Auf diesem Nordwestlaufe versiegt die Sauer in trockener Zeit völlig. Desgleichen führt auch ihre Vereinigung mit dem Schmittbach nur in regenreichen Zeiten bezw. nach der Schneeschmelze soviel Wasser, daß auch die Vereinigungsstelle mit der Altenau befeuchtet wird.

Diese aus den Bächen in die Tiefe sickernden Wässer finden unterirdisch ihren Weg nach Paderborn, wo sie in einem Teile der Paderquellen zutage treten.

Die zahlreichen Paderquellen gruppieren sich hauptsächlich um fünf einzelne Quellbassins, denen fünf Quellarme entströmen, die sich innerhalb der Stadt zur Pader vereinigen. Die Namen dieser fünf Quellarme sind in ostwestlicher Reihenfolge: Warme-, Damm-, Börne-, Roteborn-, Spülpader. Die Temperatur der Quellen der Warmen Pader liegt zwischen 12,4 und 16°; die Schwankungen während des Jahres sind im einzelnen gering. Sie führen stets klares Wasser, das durch verhältnismäßig hohen Kochsalzgehalt ausgezeichnet ist. Nur wenige Quellen dieses Bassins zeigen im Sommer Wasserabnahme. Von der Warmen Pader durch den schmalen „Damm" getrennt, findet sich das Bassin der Dammpader, deren Quellwassermengen

starken Schwankungen unterworfen sind; doch ist ihr Versiegen bisher nicht beobachtet worden. Die südwestlichen haben geringes Schwanken der relativ hohen Temperatur von 13,3 bis 13,6°. In ihnen sind Trübungen nicht beobachtet worden. Inmitten des Bassins entspringen unter starkem Druck Quellen, die mitunter getrübt sind. Ihre Temperatur ist 14 bis 14,85°.

Von der Dammpader zieht sich ein schmaler Wasserarm zur Börnepader, an dem zahlreiche, wasserreiche, häufig getrübte Quellen mit relativ stark (von 9,5 bis 12,9°) schwankender Temperatur liegen. Die Börnepader kommt aus 22 einzelnen Quellen, die nach heftigen Regengüssen trübes Wasser mit Temperaturen zwischen 9,7 und 10,65° führen. In der Nähe der Börnepader liegen die Hauptwasserleitungsquellen[1]), durch deren Infektion Paderborn mehrfach von schweren Typhusepidemien heimgesucht worden ist. Der Bakteriengehalt des Wasserleitungswassers betrug 1893 bis 1896 50 bis 150 Keime im Kubikzentimeter. Stärkere Trübungen sind nicht, minimale häufig beobachtet worden. Die Temperatur der Wasserleitungsquellen beträgt 10,15 bis 10,7°.

Die Quellen der Roteborn- und Spülpader sind wasserreich, oft getrübt und in der Temperatur stark (zwischen ca. 7 bis 11°) schwankend. Einzelne dieser Quellen weichen vom Typus ab; so ist die Rotebornquelle stets klar, aber gegenüber der Warmen Pader kalt (9,5 bis 10,25° gegenüber 12,4 bis 16°).

Danach lassen sich die Paderquellen einteilen in stets klare Quellen mit geringer Temperaturschwankung (zumeist warm, selten kalt) und zeitweilig trübe Quellen mit geringen (teils warme, teils kalt) und beträchtlicheren Temperaturschwankungen (stets kalt).

Durch Einschütten von Farbstoffen wurde festgestellt, daß die trüben Quellen ihr Wasser aus den versiegenden Bachläufen hernehmen. Das Wasser des Ellerbaches trat in den östlich gelegenen Quellen der Roteborn- und Spülpader, ferner auch in der Dammpader auf. Färbungen der Sauer vor der Vereinigung mit dem Schmittbach fanden sich in Quellen der Roteborn-, Spül- und Dammpader wieder, Färbungen der mit dem Schmittbach vereinigten Sauer dicht vor der Mündung in die Altenau dagegen nicht in Paderborn, sondern in südlich gelegenen Ortschaften. Mit Hilfe dieser Färbungen konnten also deutlich nach Nordwesten gerichtete unterirdische Wasserläufe festgestellt werden, mit deren Richtung die von Spaltenzügen und Erdfallreihen (Kluftsystemen) übereinstimmten.

[1]) Es ist dem Referenten unbekannt, ob diese seit Erscheinen der Arbeit Stilles (1903) verlegt worden sind.

Da auch die klaren Quellen im Bereiche dieser Spaltenzüge und Kluftsysteme liegen, so dürften auch sie ihr Wasser zum Teil aus diesen her haben. Möglich ist aber angesichts ihrer konstanteren und zumeist höheren Temperatur auch die Herleitung aus größerer Ferne und Tiefe; vielleicht steigt es aus den Schichten der unteren Kreide und der Cenomanpläner unterhalb mächtiger Cenomanmergel auf. Jedenfalls ist es besser filtriert als das der trüben Quellen.

Die Ursache des Aufsteigens sieht Stille in der „Stauung des in den Klüften und Spalten des Plänergebirges von Süden und Südosten herbeigeführten Wassers an der wasserundurchlässigen Decke von Emscher Mergel“. Daher nennt Stille die Paderquellen Barrierequellen.

Die Wasserführung der Pläner ist bei ihrer starken Zerklüftung und zum Teil tektonischen Zertrümmerung so reichlich, daß geradezu zusammenhängende Grundwasserströme entstanden zu sein scheinen.

7. Geologische Klassifikation der Quellen. Eine geologische Klassifikation, die zugleich eine natürliche oder genetische ist, wird sich am besten an geologisch feststellbare Eigenschaften des Quellwassers anlehnen, als deren wichtigste und am meisten aussagende das Ab- oder Aufsteigen des Wassers erscheint. Mit den Bezeichnungen A. Schwagers kann man hier von Fall- und Steigquellen sprechen. Da das Steigen der Quellwässer auf verschiedene Ursachen zurückzuführen ist, so kann man die Steigquellen einteilen in solche, deren Wasser infolge hydrostatischen Druckes, d. h. Aufstau, und solche, deren Wasser infolge des Eintretens von Gas- und Dampfblasen hochsteigt. Man kann hiernach von Stau- und Gaswasserquellen sprechen. Die Herkunft aus Grundwasser oder Schichtfugen- usw. Wasser ist für die Quelleinteilung von geringerer Bedeutung, da sie sich bei der Bewegung in den Hauptzügen doch analog verhalten, stark zerklüftete, aber an sich undurchlässige Gesteine auch die grundwasserähnliche Ansammlung von zusammenhängenden Wassermassen ermöglichen. Es ist also ein Uebergang zwischen diesen beiden Bodenwasserformen vorhanden. Doch ist in vielen Fällen ein Zusatz wie „Verwerfung“ oder „Schicht“ usw. sicherlich eine weitere gute Charakterisierung wichtiger Quellwassereigenschaften durch eine kurze Bezeichnung. „Ueberfallquellen“ sind Stauquellen, zumeist von Grund- und Schichtwasser. Die Bezeichnung „Talquelle“ sagt nur aus, daß die Quelle in einem Tale auftritt.

In kurzer Form ergibt sich das folgende Schema der Einteilung von Quellen:

1. Fallquellen mit absteigendem Grund- oder Fugenwasser;
2. Steigquellen mit aufsteigendem Grund- oder Fugenwasser;
   a) Stauquellen: Ursache des Aufsteigens hydrostatischer Druck;
   b) Gaswasserquellen: Ursache des Aufsteigens Eintritt oder Bildung von Gas- und Dampfblasen.

Chemie der Quellwässer.

8. Die gelösten Stoffe. Angesichts der großen Lösungsfähigkeit des Wassers ist zu erwarten, daß in den Quellwässern alle chemischen Elemente vorkommen dürften. Ein großer Teil von ihnen ist in der Tat auch nachgewiesen. In größeren Mengen und am häufigsten kommen vor: Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium, Eisen; daneben die übrigen Alkalien und Erdalkalien, Aluminium, Mangan, selten Schwermetalle; ferner Chlor (als Chlorwasserstoff), Kohlenstoff (als Kohlensäure und Kohlenwasserstoffe), Schwefel (als Schwefelsäure und Schwefelwasserstoff), Silicium (als Kieselsäure); daneben die übrigen Halogene, Bor (als Borsäure), Phosphor (als Phosphorsäure); im Gaszustande Stickstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Radiumemanation. Je vollkommener die analytischen Methoden werden, desto mehr Stoffe weist man in den Wässern nach. „So konnten z. B. E. Hintz und L. Grünhut im Großen Sprudel zu Neuenahr eine so geringe Jodmenge noch quantitativ bestimmen, welche in 1000 l Wasser nur 3 mg entspricht, während andere Elemente, wie Thallium, Rubidium und Cäsium in noch geringeren Mengen spektralanalytisch nachgewiesen werden konnten. Andererseits ist den analytischen Chemikern die Anwesenheit von radioaktiven Stoffen in Mineralwässern bis in die neueste Zeit entgangen" (Paul im Deutschen Bäderbuch).

Die Deutung der analytischen Ergebnisse hat zu verschiedenen Zeiten im Anschlusse an die jeweils herrschenden chemischen Theorien verschiedene Richtungen eingeschlagen. Die Analyse gibt keinen Aufschluß über den Zustand der im Wasser ermittelten Bestandteile. Früher nahm man an, daß die analytisch bestimmten Stoffe in Form von Salzen in den Wässern vorhanden seien. Daher sind die analytischen Ergebnisse in früherer Zeit zumeist unter Umrechnung der Bestandteile auf Salze publiziert. Hierbei mußte naturgemäß immer etwas willkürlich verfahren werden, da ja nicht die Salze an sich, sondern nur ihre Bestandteile analytisch festgestellt waren. Um aus dieser Schwierigkeit herauszukommen, schlug Bunsen 1871 vor, „Säuren und Basen in der Weise zu Salzen gruppiert anzunehmen, wie diese Salze bei der Konzentration ihrer Lösung durch freiwillige Verdunstung bei einer ein für allemal angenommenen Temperatur je nach dem Löslichkeitsgrade aller denkbar vorhandenen Salze der Reihe nach für sich auskristallisieren würden." Fresenius stellte dagegen die Stärke der Säuren und Basen in den Vordergrund und teilte zunächst die stärkste Säure der stärksten Base zu, dann die nächststärkste, bis alle Säuren und Basen verteilt waren.

Die Ergebnisse der physikalischen Chemie haben jedoch längst die Haltlosigkeit der Annahme allein von Salzen in den Lösungen ergeben. Selbst wenn ein reines Kochsalzwasser vorliegt, so sind in der Lösung nicht nur Kochsalzteilchen, sondern daneben oder allein Natrium- und Chlorionen vorhanden. In einem Wasser, das nach der Analyse 6 Anionen und 10 Kationen enthält, kommen möglicherweise nicht nur diese 16 freien Ionen, sondern die sämtlichen (6×10) Salzkombinationen vor.

Die neuere Analysenberechnung, wie sie Hintz und Grünhut im Deutschen Bäderbuch ausführlich erörtern, und die z. B. auch den Zusammenstellungen in F. W. Clarkes Data of Geochemistry zugrunde liegt, gibt jetzt in der Hauptsache die Menge der Ionen an, geht aber immerhin auch von unrichtigen Voraussetzungen aus, indem sie die vollständige Dissoziation der analytisch bestimmten Salzbestandteile annimmt. Clarke verfährt insofern anders als Hintz und Grünhut, als er den ganzen Salzgehalt auf 100 Teile umrechnet und die Ionenmengen in Prozenten der Gesamtsalinität angibt. Die Salinität wird in Einheiten von einer Million Teilen Wasser mitgeteilt. Hintz und Grünhut geben dagegen die Zahlen des Ionengehaltes in g auf 1 kg Wasser wieder und folgen in der weiteren Berechnung zum Teil Prinzipien, die auch in der Gesteinsanalyse angenommen sind. Um passende Vergleiche der Analysen untereinander zu ermöglichen, werden die Gewichtszahlen mit dem 1000fachen Molekulargewicht der betreffenden Ionen multipliziert und neben den so erhaltenen Millimolzahlen noch die Milligramm-Aequivalentgewichte berechnet. Nur die Milligramm-Aequivalentgewichte gewähren Aufschluß darüber, in welchen Mengen die einzelnen Bestandteile zusammengefügt gedacht werden können. Diese Zahlen wurden auch von Hintz und Grünhut zu graphischen Darstellungen benutzt, in denen die Ionen in zwei Reihen (Kationen und Anionen) durch Farbstreifen dargestellt sind, für jedes Ion eine besondere Farbe und die Länge der Streifen nach der

Größe des Milligramm-Aequivalentgewichtes modifiziert.

9. Die Abhängigkeit der gelösten Stoffe von den durchflossenen Gesteinen. Die starke Lösungsfähigkeit des Wassers bedingt naturgemäß die Abhängigkeit der gelösten Stoffe von den durchflossenen Gesteinen, sowohl in quantitativer wie in qualitativer Hinsicht. Die leichtest löslichen, d. h. die Chloride und Sulfate der Alkalien und Erdalkalien können auch der Menge nach am beträchtlichsten gelöst sein. Aus einem so wenig löslichen Gestein wie dem Granit, wird nur wenig gelöst werden können. Die Verschiedenheit in der Art der gelösten Stoffe ist so groß, daß es bei vielen Quellwässern möglich ist, ihre mutmaßliche Herkunft festzustellen. Es sind systematische Untersuchungen dieser Art angestellt worden, von denen diejenigen A. Schwagers besonders sorgfältig sind.

Ein Vergleich der verschiedenen Quellwässer führt zu folgender Zusammenstellung und Einteilung:

A. Vulkanische Wässer, oft reich an freien Säuren (CO_2, HCl, H_2SO_4); vgl. die folgenden Bemerkungen über juveniles Wasser im Sinne von E. Sueß.

B. Eruptivgesteinswässer. 1. Granitwässer (entspringen aus Granit, Porphyr, Gneis und ähnlichen Gesteinen), gehaltarm; überwiegend Alkalien (besonders Natron) als Carbonat, Chlorid, Sulfat, etwas Kieselsäure.

2. Basaltwässer (aus Basalt, Diabas und ähnlichen Gesteinen), gehaltreicher; neben Alkalien (besonders Natron) hauptsächlich Magnesia, Kalk, etwas Eisen, Carbonate; Sulfate stärker hervortretend; etwas Kieselsäure.

C. Sedimentgesteinswässer. 1. Schieferwässer (aus Glimmerschiefer, Phyllit, Tonschiefer und ähnlichen Gesteinen), gehaltarm, zum Teil ähnlich dem Granitwasser, manchmal mehr Tonerde, oft mehr Kalk.

2. Sandwässer (aus Sanden und Sandsteinen), zumeist gehaltarm; überwiegend Kalk und Natron als Carbonate, manchmal dagegen Chloride, Sulfate, etwas Kieselsäure.

3. Kalkwässer (aus Kalken, Dolomiten, Mergeln); häufig gehaltreicher, hart;[1]) überwiegend Calciumcarbonat, daneben Calciumsulfat; oft auch reich an Magnesium.

4. Solwässer (durch Auslaugung von Salzlagern entstanden); gehaltreich, weich oder hart; überwiegend Chloride, namentlich von Natrium, daneben Calcium- und Magnesiumsulfat.

5. Kohlenwässer (aus Humus- und Sapropelkohlen); reich an Carbonaten und Sulfaten, darunter viel Eisen, oft reich an freier Kohlensäure, manchmal freie Schwefelsäure; häufig Schwefelwasserstoff; organische Substanz.

D. Erzwässer (aus der Oxydationszone der Erzlager); gehaltreich; oft Schwermetallsalze; häufig freie Säure, namentlich Schwefelsäure.

Naturgemäß haben viele Quellwässer auf ihrem Laufe Substanzen aus zahlreichen verschiedenen Gesteinen aufgenommen und repräsentieren Mischwässer.

Der Gehalt des Wassers vieler Quellen ist beträchtlichen Schwankungen unterworfen, wie die Zahlen nachstehender Tabelle nach A. Schwager zeigen. Es ist das Wasser einiger kalter Fichtelgebirgsquellen von Schwager in zwei aufeinanderfolgenden Jahren zu ungefähr der gleichen Jahreszeit analysiert worden.

Diese wiederholten Wasseruntersuchungen zeigen ein beträchtliches Schwanken im Gehalte an gelösten Substanzen, das für alle Quellen charakteristisch ist, die ihr Wasser aus den atmosphärischen Niederschlägen und ihren Salzgehalt also aus den durchflossenen Gesteinen beziehen. Geringere Schwankungen zeigen die heißen Quellen. So fand Fresenius 1849 in 1000 Gewichtsteilen Wasser des Wiesbadener Kochbrunnens 8,262 Teile fester Stoffe; im Jahre 1885 8,241 Teile. Von Bedeutung ist das Feststellen von Gehaltsschwankungen zur Unterscheidung von juvenilem und vadosem Wasser.

E. Sueß hatte, wie oben schon erwähnt, die alte Theorie der vulkanischen Herkunft des Wassers gewisser heißer Quellen wieder aufgenommen. Namentlich mit Bezug auf den Karlsbader Sprudel, der als vulkanisch erscheinende Bestandteile Fluor und Bor aufweist, wurden diese Wässer als juvenil bezeichnet, während die aus Niederschlägen oder Grundwasser herrührenden Quellwässer vados genannt wurden. An sich ist bei dem Karlsbader Sprudel, der, über 70° heiß, aus einem Granit hervorkommt, die sehr geringe Menge Fluor (0,023 in 10 000 Teilen) und Borsäureanhydrid (0,028 in 10 000) nicht unbedingt beweisend für den juvenilen Ursprung des Wassers, da geringe Mengen dieser Bestandteile in allen vulkanischen Gesteinen vorhanden sind. Sie könnten also auch in den Karlsbader Sprudel durch Auslaugung hinein gekommen sein. Sueß und nach ihm besonders Gautier sehen aber den Hauptunterschied zwischen juvenilen und vadosen Wässern in

[1]) Unter der Härte eines Wassers versteht man die in ihm gelöste Menge von Kalk- und Magnesiumsalzen, die für viele technische Zwecke störende Eigenschaften besitzen und daher oft vor dem Gebrauch des Wassers entfernt werden müssen.

Datum der Probe-Entnahme	Herkunftsbezeichnung Ort, Höhe	Ursprungs-Gestein	Temperatur	Menge in Sec.-Litern	In 100 g Wasser sind enthalten in $^1/_{10}$ mg: Summe d. fixen Teile	SiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Cl	SO_3	CO_2	Glühverlust —CO_2	N_2O_5
19. 9. 1888	Pfalzbrunnen vor der Kösseine 690 m	Granit	6,5	3,75	295	83	13	3	14	7	11	33	10	45	19	51	—
6. 9. 1889	„	„	6,2	0,5	439	140	13	3	15	8	36	10	32	60	20	72	1
20. 9 1888	Weißmannquelle am Ochsenkopf 842 m	„	5	1	319	125	21	2	8	10	12	19	13	29	15	65	—
8. 9. 1889	„	„	5,5	0,2	358	130	37	3	14	10	21	21	13	34	13	51	1
24. 9. 1988	Egerquelle, 3 km von der Schneebergpyramide 752 m	Quarzphyllit	5,7	3	227	48	10	2	16	8	12	23	15	31	21	41	—
11. 9. 1889	„	„	5,6	1,6	314	97	19	2	21	10	18	24	12	42	23	46	—

der relativen Konstanz der Zusammensetzung der gelösten Stoffe ersterer gegenüber dem beträchtlichen Schwanken letzterer. Auch jene werden wohl stets etwas durch Meteorwässer beeinflußt werden, jedoch sind sie nicht direkt von diesen abhängig. Gautier findet nicht nur die genannten seltenen Bestandteile für die vulkanische Herkunft charakteristisch. Sondern nach ihm sind vadose Wässer durch die Carbonate von Kalk und Magnesia, Chloride und Sulfate ausgezeichnet. Dagegen enthalten die juvenilen Natroncarbonat, Alkalisilikate, Schwermetalle, denen Sulfate und Chloride nur akzessorisch beigemengt sind, während die Carbonate der Erdalkalien praktisch fehlen. Aber auch diese Unterscheidungen können einer strengen Kritik nicht standhalten. Die Zusammensetzung selbst kalter Quellen, die aus vulkanischen Gesteinen kommen und, wie die oben mitgeteilten Zahlen zeigen, sich schon durch ihr beträchtliches Schwanken als Meteorwässer zu erkennen geben, nähert sich der von Gautier für juvenile angegebenen. Nur Schwermetalle, wie Blei, Zinn usw. fehlen in ihnen. Diese sind jedoch auch in Quellwässern nur höchst selten nachgewiesen worden, verhältnismäßig häufig aber in den Quellabsätzen. Bei geringen Temperatur- und Ergiebigkeitsschwankungen wird andererseits auch die Konstanz der Zusammensetzung eine notwendige Konsequenz der sonstigen Regelmäßigkeiten sein. Jedenfalls scheint bis jetzt noch kein absolut sicheres Merkmal für die Unterscheidung juveniler von vadosen Wässern mit Hilfe der Analyse gegeben zu sein.

Im einzelnen hält es oft schwer, die in Quellwässern vorhandenen Stoffe aus den mutmaßlich durchflossenen Gesteinen herzuleiten. Man behilft sich in solchen Fällen bisweilen mit der Annahme weiter Wanderungen des Wassers oder des Auftretens gewisser leichtlöslicher Stoffe in tief gelegenen Teilen geologischer Horizonte, die in ihren bekannten Ausbildungsformen über Tage nichts von ihnen enthalten.

Von den Gasen, die in Quellwässern auftreten, werden Stickstoff und Sauerstoff durch Eindringen von Luft erklärt. Oft kann auch Kohlensäure, wenn sie in kleinen Mengen auftritt, diesen Ursprung haben. Größere Mengen entstammen vielfach Humuskohlen, zumeist jedoch sind sie vulkanischer Herkunft und in der Nähe von Vulkanen, sehr häufig längst erloschener, gelegen. Kohlen- und Schwefelwasserstoff sind zum Teil ebenfalls vulkanischer Herkunft, zum Teil auf die Zersetzung von Organismenresten zurückzuführen, letzterer erscheint auch als Produkt der Zersetzung von Sulfaten durch Bakterien oder von Sulfiden durch Säuren.

10. Chemische Einteilung der Quellwässer. Da unter den gelösten Bestandteilen die Zahl der Kationen die der Anionen überwiegt, so erscheint es praktisch, einer wissenschaftlich-chemischen Klassifizierung der Quellwässer die Einteilung nach den in ihnen vorhandenen Anionen zugrunde zu legen. Zudem sind oft gewisse Anionen in besonders großer Menge vorhanden, während sich gleichzeitig die Kationen oft in kleineren Zahlen verteilen. Doch heben sich auch unter den Kationen zumeist wieder einzelne vor den anderen heraus, so daß hier leicht Leitsätze für Unterteilungen zu finden sind.

Im Anschlusse an F. S. W. Clarke läßt sich die chemische Einteilung nach diesen bei einer Uebersicht erstehenden Prinzipien wie folgt zusammenfassen:

I. Chloridwässer; von Anionen überwiegend Chlor,
a) von Kationen überwiegend Natrium,
b) von Kationen überwiegend Calcium,
c) reich an Magnesium.

II. Sulfatwässer; von Anionen überwiegend das der Schwefelsäure,
a) von Kationen überwiegend Natrium,
b) von Kationen überwiegend Calcium,
c) von Kationen überwiegend Magnesium,
d) reich an Eisen und Aluminium,
e) Zink, Kupfer oder andere Schwermetallionen enthaltend.

III. Chlorid-Sulfat-Wässer; gleichmäßig Cl und SO_4 enthaltend.

IV. Carbonat-Wässer; von Anionen überwiegend CO_3 und HCO_3 enthaltend.
a) von Kationen überwiegend Natrium,
b) von Kationen überwiegend Calcium,
c) reich an Fe''-Ion (Stahlbrunnen).

Zusammensetzung von Quell-

Klasse der Einteilung	Bezeichnung der Quelle	Salzgehalt in %	Temperatur °	Anionen							
				Cl	SO_4	CO_3	SiO_2	andere seltenere			
Ia.	Utah Therme, Ogden in Utah	2,3309	55	58,79	0,94	0,61	0,20	Spur	Br —	—	—
Ia, VIII (VI)XI	Dampfbootquellen, Nevada	0,285	—	35,00	4,58	5,08	11,41	S 0,22	PO_4 0,03	B_4O_7 8,88	AsO_4 0,1
Ib	Erbohrt am Kanab, Brit.-Columbien	4,85	—	63,39	—	—	—	—	Spur	—	—
Ic	Brunnen, Whitby in Canada	4,63	—	64,43	—	0,09	—	Br 0,41	Spur	—	—
IIa	Abilena-Brunnen, Kansas	7,473	—	0,48	66,28	0,60	0,02	NO_3 Spur	—	—	—
IIb	St. Lorenzquelle, Leuk, Schweiz	0,1948	51	0,34	65,86	3,74	1,55	PO_4 Spur	AsO_4 Spur	—	Cu Spur
IIc	Cruzy, Frankreich	10,1	—	3,73	74,16	0,03	0,07	—	—	—	—
IId	Roncegno, Südtirol	0,815	—	0,03	70,93	—	1,61	PO_4 0,23	AsO_4 1,93	Zn 0,06	Cu 0,15
IIe	Shoal Creek, Miss.	0,054	—	0,48	52,76	8,00	2,54	—	—	—	—
III.	Königs-Quelle, Dallas Indiana	1,5682	—	11,10	59,68	1,67	0,07	PO_4 Spur	B_4O_7 Spur	Br Spur	—
IVa.	Grande Grille, Vichy Frankreich	0,5249	41,8	6,17	3,75	45,57	1,32	1,52	AsO_4 0,04	—	—
IVb. IVc VIII.	Wilhelmsquelle, Karlsbrunn, Oesterreichisch-Schlesien	0,06217	—	0,28	1,68	38,72	17,97	0,14	Spur	—	—
V.	Kongreß-Quelle, Saratoga, N.-York	1,2022	—	42,00	0,08	18,59	0,14	Spur	B_4O_7 Spur	Br 1,13	J 0,02
VII.	Sprudel, Karlsbad, Böhmen	0,5431	73	11,52	31,19	19,15	1,34	0,01	F 0,03	B_4O_7 Spur	J Spur
VIII.	Cascade Quelle, Olette, Ostpyrenäen	0,0244	79,4	4,38	7,28	12,14	38,91	S_2O_3 4,81	S 3,38	—	
VIII. Ia.	Großer Geysir, Island	0,1131	76—86	13,52	90,1	10,16	45,04	—	0,32	—	—
IX.	Heiße Quelle, Schwefelbank, Californien	0,5343	—	16,49	Spur	21,96	5,64	B_4O_7 25,61	—	—	—
X.	Der heilige Brunnen Zem-Zem, Mekka	0,3455	—	16,44	14,04	12,78	1,39	—	NO_3 24,62		
XI.	Viry, Seine et Oise, Frankreich	0,0490	—	5,11	7,74	19,46	4,04	PO_4 22,41	6,33	—	—
XIIa.	Tuscarora Säure-Quelle, Brantford, Canada	0,6161	—	—	22,11	—	—	PO_4 Spur	H_2SO_4 frei 69,62	—	—
XIIa.	Camerons Bad, Rotorua Geysir, Neu-Seeland	0,1862	—	—	20,21	—	5,39	Spur	59,11	HCl frei 5,60	—
XIIb.	Brook Sungi Pait, Java, Krater des Idjen-Vulkans	1,8060	—	14,95	26,96	—	0,33	—	—	43,96	—

V. **Chlorid-Carbonat-Wässer.**

VI. **Sulfat-Carbonat-Wässer.**

VII. **Chlorid-Sulfat-Carbonat-Wässer.**

VIII. **Kiesel-Wässer**; reich an SiO_2.

IX. **Borat-Wässer**; von Anionen überwiegend B_4O_7.

X. **Nitrat-Wässer**; von Anionen überwiegend NO_3.

XI. **Phosphat-Wässer**; von Anionen überwiegend PO_4.

XII. **Saure Wässer**; freie Säure enthaltend.

a) hauptsächlich Schwefelsäure,

b) hauptsächlich Salzsäure.

In nachstehender Tabelle ist eine Anzahl von **Clarkes** Daten in der von ihm gegebenen Einteilung zusammengefaßt. Angefügt ist

wässern. Nach Clarke.

Kationen										Herkunftsbezeichnung	Nummer
Na	K	Ca	Mg	Fe	Al	andere seltenere					
30,38	3,76	4,90	0,40	—	0,02	Li Spur	—	—	—	Solwasser	1
30,35	3,79	0,25	0,01	Spur	0,01	0,27	Sb 0,02	Hg Spur	—	Vulkanisches Wasser	2
5,27	0,42	30,89	0,03	—	—	—	—	—	—	Solwasser	3
10,17	Spur	13,68	5,22	Spur	—	—	—	—	—	Solwasser	4
30,46	1,08	0,67	0,41	Spur	—	—	—	—	—	?	5
1,50	0,30	23,55	3,07	Spur	0,03	Li Spur	NH_4 Spur	Ba Spur	Sr 0,05	?	6
4,50	0,03	0,02	17,45	0,01	—	—	—	—	—	Solwasser	7
1,25	0,23	7,08	8,93	0,03	3,09	Fe 11,09	Mn 078,	Co 0,17	Ni 0,41	Erzwasser	8
0,67	0,46	11,32	0,71	0,11	0,08	Cd 0,10	0,42	Zn 2,31	Cu 0,04	Erzwasser	9
13,89	0,49	2,91	10,19	Spur	Spur	BaSr Spur	Li Mn Spur	Zn Spur	Ni Spur	Solwasser	10
35,27	2,88	2,29	1,11	0,04	—	Sr 0,04				warmes Granitwasser	11
1,36	0,46	17,18	4,89	17,24	0,07	Spur	Li Spur	Mn 0 01	—	z. T. Kalkwasser	12
27,62	0,78	6,03	3,41	0,03	Spur	Spur	0,08	Ba 0,09	—	—	13
32,49	1,35	2,23	0,65	0,02	Spur	0,01	Spur	Mn 0,01	Sr 0,01	Solwasser	14
20,09	2,00	1,01	Spur	—	—	—	—	—	—	heißes Granitwasser	15
19,71	1,88	0,08	—	—	—	NH_4 0,28	—	—	—	vulkanisches Wasser	16
24,99	Spur	Spur	Spur	—	NH_4 0,40	—	—	7,88	—	vulkanisches Wasser	17
12,06	0,67	8,70	2,70	—	—	—	—	—	—	Organismen-Wasser	18
3,32	Spur	30,38	1,21	—	—	Li Spur	—	—	—	Tonwasser	19
0,26	0,44	3,70	0,50	2,17	1,20	—	—	—	—	Erzwasser	20
8,35	0,32	0,47	0,22	0,33	Spur	—	—	—	—	vulkanisches Wasser	— 21
1,32	0,39	2,05	0,94	Fe''' 4,66	4,44	—	—	—	—	vulkanisches Wasser	22

ein Vergleich mit der oben versuchten Einteilung nach dem Ursprungsgestein. Ein Teil von Clarkes Gruppen fällt mit solchen der obigen Einteilung zusammen. So ist die Mehrzahl der Chlorid- und Sulfatwässer zu den Solwässern zu rechnen. Die Carbonatwässer der Gruppe IVb entsprechen den Kalkwässern; die Kieselwässer gehören oftmals zu den Granitwässern. Aber z. B. unter den Sulfatwässern würde die Gruppe IId sich auf vulkanische, Kohlen- und Erzwässer verteilen lassen, die zum Teil auch freie Säure führen können. Zu den Kieselwässern sind auch die Phyllitwässer zu rechnen.

Im einzelnen ist zu den Wässern in Clarkes Einteilung zu sagen: Wässer der Zusammensetzung Ia sind sehr häufig. Sie meist gehaltreich. Kalium, Lithium, Jod und Brom kommen vor, Jod sehr selten auch frei, wodurch das Wasser eine braune Farbe erhält. In der Regel sind es Solwässer, aber in seltenen Fällen kann auch ein vulkanisches Wasser hierher zu zählen sein. Doch hat dieses dann neben geringem Gehalte noch eine Anzahl besonderer Bestandteile, die seine Herkunft klar legen. Ib und c sind selten. Desgleichen IIa. IIb sind gehaltärmere Gipswässer. Dagegen ist IIc wesentlich gehaltreicher. IId enthält als Erzwasser oft zahlreiche andere Schwermetalle, die bisweilen in IIe überwiegen. Zinkvitriolwässer sind meist auch reich an Kalk, sonst relativ wenig gehaltreich, was jedoch nicht auch für Kupfervitriolwässer gilt. Unter die Carbonatwässer II gehören die meisten Trink- und Gebrauchwässer. Die Natronwässer sind auch in dieser Gruppe wesentlich gehaltreicher, als die Kalkwässer. Die Kieselwässer VIII sind zum Teil reine Granitwässer und dann gehaltsarm. Die vulkanischen Kieselwässer (z. B. Geysirwässer) sind gehaltreicher, namentlich an Chlornatrium. Die Boratwässer IX sind relativ gehaltarme vulkanische Wässer. Ein Nitratwasser X ist der Brunnen Zem-Zem in Mekka. Der Nitratgehalt stammt wohl aus zersetzten Organismenresten. Von den gehaltarmen Phosphatwässern XI ist die Analyse eines seltenen Tonwassers mitgeteilt. Die sauren Wässer pflegen bei Vorhandensein von freier Schwefelsäure diese ganz überwiegend, neben freier Salzsäure aber noch gebundene Schwefelsäure zu enthalten. Sie gehören zu den vulkanischen Erz- und Humuskohlenwässern, von denen die letzteren die säureärmsten sind.

In der Regel hat Clarke in den vorstehend wiedergegebenen Analysenzahlen die freie Kohlensänre mit als CO_2" berechnet.

11. Die Radioaktivität der Quellwässer. Wie erwähnt, war lange Zeit den Chemikern die Radioaktivität der Quellwässer entgangen. Erst Sella und Pocchettino, ferner J. J. Thomson, F. Himstedt machten 1902 und 1903 fast gleichzeitig die Entdeckung, daß Luft, durch Wasser geleitet, an elektrischer Leitfähigkeit zunahm, und zwar verhielten sich Wasserproben verschiedener Herkunft verschieden. Während alles Quellwasser und frisch heraufgeholtes Grundwasser diese Eigenschaft zeigte, fehlte sie Wasser, das längere Zeit an der Luft gestanden hatte, auch dem Wasser der Teiche, Seen und Flüsse. Es zeigte sich, daß in den leitend machenden Wässern ein radio-aktives Gas, eine Emanation, vorhanden war, das von der durchgepreßten Luft mitgenommen wurde. Diese Emanation konnte als identisch mit der Radiumemanation nachgewiesen werden: die beiden Arten zeigen das gleiche Abklingen (in etwa 4 Tagen Abfall auf die Hälfte), den gleichen Kondensationspunkt (etwa —150°), denselben Absorptionskoeffizienten in verschiedenen Flüssigkeiten (1 l Petroleum absorbiert etwa 20mal soviel als 1 l Wasser), die gleiche Erscheinung des Szintillierens an einem Sidotblendeschirm. Schließlich konnten Elster und Geitel in dem Schlamm der besonders wirksamen Baden-Badener Thermen Radium nachweisen (vgl. Himstedt im Deutschen Bäderbuch).

Sehr bald nach den ersten Versuchen wurde eine große und noch stets steigende Zahl von Quellen auf ihre Radioaktivität geprüft. Petrascheck hat eine Zusammenstellung über die bis 1908 bekannt gewordenen Daten gegeben, von denen einige in der beigegebenen Tabelle zusammengestellt sind. Die Zahlen der Tabelle wurden so gewählt, daß sie über die jeweils größte und kleinste Radioaktivität unter den Quellen der einzelnen Gruppen Aufschluß geben. Das Maß der Emanation ist mit $i.10^3$ bezeichnet. i bedeutet nach dem Vorschlag von Mache und Meyer in elektrostatischen Einheiten die Stärke desjenigen Sättigungsstromes, den die in 1 l Wasser enthaltene Emanation unterhalten kann. Diese Zahlen sind mit 10^3 multipliziert.

Da die Emanation ein Gas ist, so sind Faktoren, welche die Löslichkeit von Gasen in Wasser bestimmen, von Einfluß auf die Radioaktivität der Quellen. Reichliche Gasentwickelung und Salzgehalt bedingen eine geringe Aktivität. Thermen sind im allgemeinen stärker radiumhaltig als kalte Quellen, doch sind innerhalb bestimmter Thermenkomplexe die kälteren Quellen oft vor den wärmeren begünstigt, da hohe Temperatur ebenfalls eine gewisse Austreibung der Emanation bewirkt. Die Zahlen der Tabelle lassen gewisse regelmäßige Beziehungen zwischen der Stärke der Aktivität und dem Ursprungsgestein der Quellen erkennen. Einfache kalte Quellen haben im

Ort	Quelle	I 10^3	Temperatur	Ergiebigkeit in Hektolitern täglich	Chemischer Charakter und Fixbestandteile pro Liter	Gestein	Autor
Granit und Orthogneis							
Gastein	Grabenbäck.	155.—	36°	1100	einfache Quelle	Gneis	Mache und Meyer
Wildbad, Württemberg	—	1,85	36°	—	0,7 g Fix.	Granit	Koch
Karlsbad	Mühlbrunn	31,5	39°	100	sal.-alkal.-mur.	Granit	Mache und Meyer
Andere Eruptivgesteine							
Kreuznach	Haus-Nr. 5	27,6	24°	—	Kreuznacher Quellen 9-17 g Fix. erdmuriat. Na Cl-Quelle	Porphyr	Schmidt und Kuntz
Teplitz, Böhmen	Steinbad	6,6	32°	3960	einfache Quellen	Porphyr	Mache und Meyer
Rohitsch-Sauerbrunnen Steiermark	Tempel	0,2	9°	—	Eisensäuerl. 6 g Fix.	Andesit	Mache und Meyer
Phyllite und Tonschiefer							
Pfäffers	—	0,33	37°	57,600	einfache Qu. 0,3 g Fix	Bündener Schiefer	v. Sury
Froy, Tirol	Magenquelle	51,—	6°	—	Trinkwasser	Quarzphyllit	Bamberger
Baden bei Wien	Franzensbad	7,9	34°	110	Schwefelquelle 1,9 g Fix.	mioc. Tegel, alpine Trias	Mache und Meyer
Tone							
Vöslau	neue freie Quelle	0,8	21°	—	einfache Quelle	miocäne Tegel u. Konglomerate, alpine Trias	Mache und Meyer
Vorherrschend sandige Gesteine							
Schwarzenberg bei Bern	—	0,16	kalt	—	indifferent	Molassesandstein	v. Sury
Stockholm, Schweden	—	8,9	kalt	—	Trinkwasser	Glazialdiluvium	Sjögren und Sahlbom
Kalke							
Eyach, Württemberg	Sprudel	0,5	9°	300	sulfat. Bitterquelle 5 g Fix.	Muschelkalk	Koch
Aix les Bains	Alaunquelle	56	46°	groß	sal. Bitterquelle 3,1 g Fix.	Ugronkalk	Curie und Laborde
Bereich jungvulkanischer Eruptionen							
Ischia	altrömische Quelle	372,2	57°	—	—	Trachyttuff	Engler und Sieveking
Kissingen	Rakoczy	2,8	11	58—1150	erdig-sulfat.-NaCl-Säuerling, 9 g Fix.	Muschelkalk, Buntsandstein, Zechstein, Basalt	Jentzsch

Granit höhere Aktivität als in kristallinen Schiefern und Phylliten, in diesen wieder höhere als in Tonen und Sanden bezw. Sandsteinen, in beiden höhere als in Kalken. „Wenn die wenigen Messungen ein genügend verläßliches Urteil zulassen, so sind tonige Sedimentärschichten sandigen gegenüber begünstigt. Daß im schwedischen Glazialdiluvium etwas höhere Werte erscheinen, liegt daran, daß dieses aus Detritus von kristallinen Schiefern und Graniten besteht. Mehreren hochaktiven Wildbädern im Granit stehen nur zwei aber sehr schwach aktive im Phyllit gegenüber. Auch bei salzreichen Thermen sind die des Granits begünstigt. Außer diesem Zusammenhange mit dem durchströmten Gestein ist noch unverkennbar, daß die Nähe jung vulkanischer Eruptionen auf den Emanationsreichtum von günstigem Einfluß ist."

12. Die Quellabsätze und die Einwirkung der Quellwässer auf die Nachbargesteine. Häufig schlagen Quellwässer vor, bei oder nach ihrem Austritte Absätze nieder, die naturgemäß in engen Beziehungen zu den gelösten Stoffen stehen müssen. Zumeist ist der Niederschlag auf rein chemischem Wege erfolgt, gelegentlich sind jedoch auch Organismen die Veranlassung gewesen und haben dann nicht selten die gelösten Stoffe unter Aufnahme gewisser Teile umgewandelt. So werden durch Schwefelbakterien die Sulfate von Quellen in Sulfide, Schwefelwasserstoff oder Schwefel umgewandelt. Auch bei dem auf rein chemischem Wege erfolgten Absatze können infolge der Einwirkung in den Quellwässern vorhandener Stoffe Umwandlungen im chemischen Charakter erfolgen, z. B. die bei Zutritt von Luftsauerstoff zu Lösungen von Eisenoxydulsalzen (oft auch unter Vermittelung niedriger Organismen, Algen usw.?) stattfindende Oxydation zu Eisenoxyd, das in (wasserfreier oder) wasserhaltiger Form ausfällt. Wohl kaum jemals fällt die ganze gelöste Menge als Absatz aus, wenn oft auch beträchtliche Teile niedergeschlagen werden. Die Ursache der Abscheidung liegt außer im Einwirken von Organismen und von Luft einerseits in dem Entweichen von Gasen, die wie die Kohlensäure die wenig löslichen Carbonate besonders von Kalk und Eisenoxydul in der Form von Bicarbonaten gelöst hatte. Andererseits in Temperaturänderungen bei den heißen Quellwässern, deren Lösungsfähigkeit für viele Salze mit der Temperatur abnimmt.

Der Niederschlag von Eisenoxydhydraten tritt bei vielen Quellwässern auf, wenn sie eine Zeitlang offen an der Luft stehen. Infolge der großen Verbreitung der Eisenoxydulsalze in Wässsern sind unter den Quellabsätzen ganz allgemein Eisenoxydniederschläge häufig, die gelbe, braune, braunrote, rote und schwarze Farbe haben. Oft sind diese Niederschläge stark angereichert und bilden Eisenerzlager. So sind die Raseneisenerze bisweilen Abscheidungen aus kalten Quellen, Eisenocker der verschiedenen Gelb- und Rotfarben auch solche aus warmen Quellen.

Auch andere Erzlager werden von Quellwässern gebildet. So schlägt sich Spateisenstein infolge des Entweichens der Kohlensäure als Spaltenausfüllung nieder und bildet Gänge. In den Eisenabsätzen sind Arsen und Kupfer häufig, die ja auch in den Wässern ebenso wie Zink, Kobalt, Nickel, Antimon nicht selten nachgewiesen wurden. Blei und Zinn, die in Quellwässern sehr selten nachweisbar sind, wurden vielfach in Quellabsätzen gefunden. So in Wiesbaden, Soden, Homburg, Rippoldsau, Alexisbad, Driburg, Brückenau, Kissingen, Mondorff bei Luxemburg, Liebenstein. Zinnerz- und Bleierzlagerstätten werden daher vielfach als Niederschläge aus heißen Quellen angesehen.

Absätze von ähnlicher Entstehung wie die Spateisengänge sind die Kalksinterbildungen, die aus kalten Quellen zumeist (nach einem kolloiden Zwischenstadium) als Kalkspat, aus warmen zumeist als Aragonit ausfallen. Die Kalkspatsinterbildungen sind in Kalkgebirgen häufig, die Aragonitsinter treten oft fern von solchen auf. Die Sinter bilden Schalen und dichte Lagen, die bisweilen von später auftretenden Quellen wieder zersetzt und umgewandelt werden können. So ist bei Tolfa in der römischen Campagna der Kalksinter, der aus einer 62,5° warmen Quelle am Gehänge eines hohen Berges als eine 400 m breite und 600 m lange Ebene mit fast senkrechtem Absturz in das Tal gebildet ist, zum Teil durch einen lauwarmen Eisensäuerling in kalkigen, von weißen Kalk- und Aragonitadern durchzogenen Roteisenstein umgewandelt worden.

Von einzelnen der Quellwässer, deren Analysen in der obigen Tabelle wiedergegeben wurden, sind auch die Absätze untersucht worden. Es sind dies die Dampfbootquellen von Nevada Nr. 2, die Grande-Grille von Vichy Nr. 11, der Karlsbader Sprudel Nr. 14, die Cascade-Quelle von Olette Nr. 15, der große Geysir von Island Nr. 16. Von diesen führten die Dampfbootquellen und der große Geysir vulkanisches Wasser, das beträchtliche Mengen von Alkalisalzen (Chloride, Sulfate, Carbonate) und Kieselsäure, erstere außerdem von Borsäure enthielt. Von diesen Stoffen ist in erster Linie die Kieselsäure zum Absatz gelangt. Die Sinter enthalten:

Sinter der	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	H_2O	Summe
Dampfbootquellen .	92,67	0,80		0,14	0,05	0,18	0,75	5,45	100,04
Großer Geysir I . .	84,43	3,07	1,91	0,70	1,06	0,92		7,88	99,97
„ „ II . .	87,67	0,71		0,40	—	Spur	0,82	10,40	100
„ „ III . .	87,91	1,52		1,71	—	Spur	0,66	89,0	100

Es ist also von dem reichen Salzgehalte fast nichts in die Niederschläge hineingegangen. Die Kieselsäure, die bisweilen chalcedonartig und kugelig abgesondert ist, enthält eine beträchtliche Wassermenge. Sie wird als Geyserit bezeichnet. Die 3 Analysen des Geyserites vom großen Geysir zeigen eine wechselnde Beschaffenheit, die bei Quellabsätzen stets zu beobachten ist.

Die Grande Grille, ein warmes Granitwasser mit etwas freier Kohlensäure, hat einen feinkörnigen, durch Eisenoxyd geröteten Kalksinter gebildet von der Zusammensetzung (Summe 98,80)

Unlosliches (Ton)	Al_2O_3	Fe_2O_3	$CaCO_3$	$MgCO_3$	$MnCO_3$	$SrCO_3$	SiO_2	As_2O_7	P_2O_5	H_2O org. Subst.
3.72	0,30	1,84	80.17	6,85	0,29	0,40	1,10	1,10	Spur	3,03

Alle diese Stoffe sind im Wasser nachgewiesen, aber nur in geringen Mengen. Wenn man im Wasser alles Ca'' als $CaCO_3$, alles Mg'' als $MgCO_3$, alles Sr'' als $SrCO_3$ annähme, dann würden sich diese Mengen wie 3,45:2,77:0,07 verhalten. Diese hätten beim Absatz eine Konzentration um das 23- bezw. 2,5- bezw. 6-fache erfahren; entsprechend das Eisenoxyd um das 26-fache, die Arsensäure um das 27-fache; die Kieselsäure wäre sogar absolut geringer. Danach wären also kohlensaurer Kalk, Eisenoxyd und Arsensäure als die schwerst löslichen Stoffe dieser Quelle zu betrachten, die am leichtesten ausfallen. Magnesium bleibt unter den Absatzbedingungen überwiegend löslich. In noch höherem Grade die Kieselsäure in dem alkalischen Wasser.

Die Cascade-Quelle von Olette ist ein heißes Granitwasser ohne freie Kohlensäure, verhältnismäßig reich an Kieselsäure, daneben Alkali- (besonders Natrium-)chlorid, -sulfat, -carbonat, ferner mit Schwefelüberschuß. Im ganzen entspricht die Zusammensetzung denen der kalten Granitquellen Schwagers. Die bei der Gehaltarmut nur in geringer Menge vorhandene Tonerde ist wie die noch spärlicheren Eisenoxyde nicht bestimmt worden. Die Quelle setzt einen roten Schlamm ab, der nach J. Bouis 74,5% SiO_2, 17,9% Al_2O_3 und Fe_2O_3 und 7,5% Wasser enthält, zusammen 99,9. In den Spalten des grauen Felsites, aus dem die Quelle entspringt, bilden sich Kieselstalaktiten, in denen bisweilen sehr kleine Quarzkristalle sitzen. Mitunter sind sie von Gipskristallen bedeckt. Auf einem Fels ist eine 1 bis 2 mm starke, weiße, strahlige, sehr harte Sinterhaut abgelagert, die als derber Stilbit erkannt wurde. Hier hat also die Bildung von kieselsäurereichem Ton stattgefunden, in dem bisweilen reine Kieselsäure und der geringe Kalkgehalt des Wassers als Gips abgeschieden ist.

Wohl am häufigsten studiert ist der Absatz des Karlsbader Sprudels, die Sprudelschale. Von Berzelius, Chandler und Ragsky rühren die nachstehenden Analysen her;

	a	b	c	d	e
$FeCO_3$	12,13	—	—	—	—
Fe_2O_3	19,35	0,43	—	—	0,41
Mn_2O_3	—	Spur	—	—	Spur
$CaCO_3$	53,20	96,47	97,00	93,57	96,82
$SrCO_3$	—	0,30	0,32	—	0,20
$Fe_2(PO_4)_2$ bas.	1,77	—	—	1,50	—
$Al_2(PO_4)_2$	0,60	0,10	0,59	—	0,13
$Ca_3(PO_4)_2$	—	0,06		1,37	0,05
$CaFl_2$	—	0,99	0,69		0,97
$CaSO_4$	—	—	—		—
SiO_2	3,95	—	—	—	Spur
H_2O	9,00	1,59	1,40	3,56	1,30
	100	99,94	100	100	99,94

Die Analysen zeigen die außerordentlichen Verschiedenheiten der Sprudelschale. Die ersten Absätze sind reich an Kieselsäure und namentlich Eisenoxyden, während Aragonit nicht viel mehr als die Hälfte der Substanz ausmacht. Dagegen sind die späteren Niederschläge eisen- und kieselsäurearm und bestehen fast ganz aus Aragonit. Die sehr merkwürdigen Erscheinungen des Absatzes, der vielfach den Granit durchsetzt, verkieselt, aufgeblättert hat, sind neuerdings eingehend von F. E. Sueß studiert worden. Konglomerate sind zu harten Bänken verkittet; Hornsteinadern, Eisenocker, Aragonitschalen und -erbsen sind übereinandergelagert oder durchsetzen

einander. Außerdem ist der Granit an vielen Stellen mehr oder weniger zersetzt; entweder nur ausgebleicht oder kaolinisiert oder in basenreiche Tone umgewandelt.

Eine derartige Zersetzung von Gesteinen in der Nachbarschaft von Quellen wird oft beobachtet. Es scheint möglich, die folgenden Regeln der Einwirkung von Quellwässern auf Silikatgesteine festzustellen: gehaltarme, kalte und heiße Wässer scheinen kaum nennenswert oder feststellbar anzugreifen; kalte, kohlensäurehaltige, gehaltarme Quellen verwandeln Alkalifeldspat in Kaolin, Anorthit in Halloysit und lösen Eisenoxydul heraus bezw. wandeln es in Spateisen um; heiße, gehaltreiche, kohlensäurehaltige Wässer bringen tonige, basenreiche Zersetzungsprodukte hervor, die zum Teil bisweilen in Form von Zeolithen kristallisiert erscheinen. Schwefel- und salzsäurehaltige Wässer laugen die Gesteine völlig aus unter Abscheidung von Kieselsäure.

Physik und Technik der Quellen.

13. Ueber Thermen. Nach ihrer verschiedenen Temperatur werden unter den Quellen kalte und warme (Thermen) unterschieden. Als Therme wird streng genommen jede Quelle bezeichnet, die eine höhere Temperatur als die des Jahresmittels am Quellort besitzt. Von diesem Standpunkte aus konnte Rothpletz die Quellen von St. Moritz in der Schweiz trotz ihrer niedrigen Temperatur von 5 bis 7° als Thermen bezeichnen, da das Jahresmittel nur 1,1° beträgt. In der Mineralquellenkunde weicht aber die Definition des Begriffes Therme von der in der Geologie üblichen ab. Man bezeichnet dort infolge Uebereinkunft nur solche Quellen als Thermen, deren Wassertemperatur 20° übersteigt.

Nur flachgründige Quellen, deren Wasser aus geringer Tiefe stammt, haben eine der mittleren Jahrestemperatur gleichkommende Wärme. Da aber von etwa 10 m Tiefe ab eine Temperatursteigerung nach dem Erdinnern zu um 1° auf je 30 m eintritt, so müssen auch Wässer aus größerer Tiefe höhere Temperaturen aufweisen. Falls die hydrothermische Tiefenstufe dieser geothermischen entsprechen würde, müßte man z. B. für die Thermen von Aachen-Burtscheid mit 76° eine Tiefe des Ursprungsortes von fast 2000 m, für die Friedrichsquelle in Baden-Baden mit 62,8° eine solche von etwa 1500 m, für die Quelle von Wildbad mit 36° eine Tiefe von etwa 800 m berechnen. Hydrothermische und geothermische Tiefenstufe entsprechen jedoch einander nicht genau. Bei einer Untersuchung von 73 Quellen des Gotthardtunnels fand Stapff, daß nur in einem Falle Wasser- und Gesteinstemperatur übereinstimmten. Sonst differierten sie in verschiedener Weise.

Thermen, die ihre Temperatur nur der Erdwärme verdanken, werden als „Geothermen“ bezeichnet. Hierher gehören die meisten Wildbäder, deren Wasser nur wenig Gelöstes und auch fast keine Kohlensäure enthält. Teils sind es Fall-, teils Steigquellen, die wohl stets Fugenwasser führen. Sie kommen fast nur in stark zerklüfteten und im Bau gestörten Gebirgen vor. Im Verbande mit vulkanischen Erscheinungen treten die „Vulkanothermen“ auf, unter denen eine besondere Erscheinung die Springquellen oder Geysire bilden. Ihr Hauptmerkmal ist das intermittierende Hochspringen von Wasser in Strahlen, das in regelmäßigen oder unregelmäßigen Abständen erfolgt. Die Wassertemperatur ist hoch und steigt vielfach bei Annäherung eines Ausbruches fast bis zum Siedepunkt. Bei Springquellen, deren Wasser in senkrechten Röhren steht, hat man in einiger Tiefe Temperaturen von über 100° gemessen. Die Entstehung des Phänomens wird verschieden beurteilt. G. Bischof nahm das Vorhandensein mit Wasser erfüllter Hohlräume in der Tiefe an, die durch Zuströmen überhitzten Wasserdampfes von unten her erhitzt würden. Sobald die Dampfspannung den Druck der Wassersäule überschritt, mußte ein Hinaustreiben des Wassers eintreten. Versuche mit einer Röhre, bei der ein angenommener Hohlraum durch ein im Winkel von 110° abgebogenes Rohrstück ersetzt wurde, zeigten bei der Erhitzung dieses Stückes in der Tat energischen Wasserauswurf. Bunsen verwies demgegenüber namentlich auf die starke Temperaturzunahme nach der Tiefe. Durch stete Wärmezufuhr aus dem Innern würde der Druck der belastenden Wassersäule durch den sich bildenden Dampf überwunden und diese herausgeschleudert. Danach bedürfe es keines Hohlraumes. Auch diese Theorie wurde durch das Experiment gestützt. Geysire sind von den Azoren, aus Kalifornien, Celebes, San Domingo, Island, Neuseeland, Nevada, Tibet, dem Yellowstone Parke beschrieben worden, von denen namentlich die des letzteren sehr zahlreich sind.

Erhöhte Wassertemperaturen bei Quellen können auch durch chemische Prozesse verursacht werden, die in Gesteinen verlaufen, z. B. durch Oxydation von Sulfiden und brennbaren organogenen Gesteinen (Kohlen).

14. Ergiebigkeit. Als die Ergiebigkeit bezeichnet man die auf die Zeiteinheit bezogene, in Bewegung befindliche Wassermenge. Sie ist das Produkt der Einwirkung vieler Faktoren. Es kommen nach Knett in Betracht: die Niederschläge im Quellgebiet; der Luftdruck; die Spannungshöhen der Quellen; die Spannung in unterirdischen Gas- und Wassersammlungen; der Wasser-

stand benachbarter Tage- und Grundwässer; die hydrostatischen Verhältnisse der Bodenwässer im Quellgebiete; kosmische Einflüsse. Nicht alle diese Faktoren sind bei allen Quellen gleichmäßig von Bedeutung, manchmal sind einzelne zu vernachlässigen.

Wie die Niederschläge im Quellgebiete die Ergiebigkeit beeinflussen, sahen wir im geologischen Teile an den Erdfallquellen des Hainich. Hier waren die langhaltenden und tief eindringenden Winterniederschläge die Ursachen der größeren Ergiebigkeit. Ganz allgemein läßt sich wohl für vadose Quellen die Abhängigkeit des Wasserreichtums von klimatischen Faktoren feststellen. Ihr Vorkommen ist fast völlig auf Gebiete mit humidem Klima beschränkt.

Eine besondere Art der Abhängigkeit vom Klima läßt sich in Hochgebirgen feststellen, n denen Vereisungen auf stark zerklüfteten oder zerspaltenen Gesteinen vorkommen. Während der warmen Jahreszeit schmilzt das Gletschereis ab, die Schmelzwässer dringen auf den Klüften in die Tiefe und treten in den Tälern als mächtige, eiskalte Quellen oder Quellströme an die Oberfläche, die desto stärker sind, je größer die Sommerwärme ist. Im Winter sind solche Quellen versiegt. Als Beispiel seien die sieben Quellen von Engelberg in der Schweiz erwähnt. Es handelt sich hier um Quellverhältnisse namentlich in Kalkgebirgen, die zur Verkarstung neigen. In allen Karstgebieten, die durch Undurchlässigkeit der Gesteine, aber starke Zerklüftung ausgezeichnet sind (vgl. den Abschnitt über die Paderquellen), macht sich die Abhängigkeit des Wasserreichtums der Quellen von den Niederschlagsschwankungen besonders stark bemerkbar. Die Zahl der periodischen Quellen, die bisweilen nicht fließen, ist groß. Andererseits ist die Sammlung des Wassers zu einzelnen starken Adern im Karst besonders markant. Es sind hier unterirdische Flüsse vorhanden, die stellenweise als schiffbare Quellen, sogenannte Vaucluse-Quellen, hervortreten. Das bekannteste Beispiel einer solchen Quelle auf deutschem Boden ist der Blautopf bei Blaubeuren.

Die Abhängigkeit der Ergiebigkeit vom Luftdruck ist schon 1789 von David Becher am Karlsbader Sprudel erkannt worden. „Wenn nach heiterem Wetter ein Gewitter oder Regen folget, wobei der Merkur im Wetterglas den verminderten Druck der Luft anzeiget: so stößt der Sprudel sein Wasser mit mehr Gewalt, mehr Getöse und auf eine größere Höhe aus.“ Eine ziffernmäßige Bestätigung dieser alten Beobachtung wurde in neuerer Zeit durch Knett gegeben. Knett stellte seine Messungen an aufeinanderfolgenden Tagen während dreier Monate an. Einige seiner Zahlen gebe ich nachstehend:

Datum	Luftdruck	Ergiebigkeit in Litern pro Minute			
		Russ. Kronquelle	Schloßbrunnen	Mühlbrunnen	Theresienbrunnen
	mm				
11. 10. 97	729	3,947	4,884	8,867	12,223
12.	722	4,017	5,120	8,945	12,189
13.	727	3,929	4,982	8,892	12,153
14.	726,5	3,907	4,873	8,856	12,153
15.	730	3,702	4,921	8,825	11,965
16.	728,5	3,901	4,769	8,866	12,101
18.	736	3,684	4,751	8,786	11,915
19.	736	3,721	4,799	8,750	11,996
20.	732	3,811	4,690	8,789	12,043
21.	735	3,638	4,799	8,766	11,897
22.	739	3,580	4,702	8,776	11,772
23.	737	3,708	4,729	8,726	11,872
25.	740,5	3,790	4,680	8,750	11,967
26.	740	3,774	4,715	8,700	12,016

Mit kleinen Abweichungen zeigt sich das Schwanken der Ergiebigkeit dieser Quellen mit dem Luftdruck. Je höher der Druck, desto geringer die Wassermenge. Aehnliche Beobachtungen sind auch an anderen Steig- und Gaswasserquellen gemacht worden, so von Cartellieri an der Franzensquelle in Eger-Franzensbad.

Unter der Spannungshöhe ist die Seehöhe, bei ungefaßten Quellen des Austrittes aus dem Gestein, bei gefaßten Quellen des Brunnenauslaufes zu verstehen. Je tiefer eine Quelle gespannt ist, desto ergiebiger ist sie; je höher man ihren Ausfluß legt, desto schneller nimmt ihre Wassermenge ab. Besonders bei aufsteigenden Quellen ist dieser Faktor von Bedeutung.

Die Spannung unterirdischer Gas- und Wasseransammlungen ist für den Wasserreichtum von Sprudelquellen von Bedeutung. Beim Karlsbader Sprudel ist darunter der in und unter der Sprudelschale jeweilig herrschende Druck des Flüssigkeits- und Gasgemisches zu verstehen. „Er ist abhängig von dem Verhältnis der Querschnittsummen aller Oeffnungen in der Sprudelschale zum unterirdischen Wasserzudrang, sowie von der Spannungshöhe der einzelnen Sprudelfassungen, die sich in die Funktionen von Ventilen und Ueberläufen teilen.“ Knett hat hierfür den mathematischen Ausdruck $S = \frac{W.H}{Q}$ gefunden, worin W den Wasserzufluß, Q die Querschnittsumme der gefaßten Sprudelquelle, H die Spannungshöhe des Sprudels bedeutet.

Die Einwirkung des Wasserstandes von Tage- und Grundwasseransammlungen auf

die Ergiebigkeit ist namentlich bei aufsteigenden Quellen bemerkbar. Je höher der Wasserstand, desto höher der hydrostatische Druck, desto größer also die Ergiebigkeit. Auch durch das Verschließen von seitlichen Kohlensäureausströmungen wirkt ein höherer Wasserstand im gleichen Sinne.

Die Hydrostatik der Bodenwässer ist ein Ergiebigkeitsfaktor, der namentlich bei Quellschutzuntersuchungen zu berücksichtigen ist. Es ist stets die Gefahr vorhanden, daß unter das Niveau des Quellaustrittes heruntergehender Bergbau der Quellnachbarschaft Wasseradern anfährt, die die Steighöhe von Steigquellen herabsetzen, insofern als wichtige Quelläste abgeleitet werden können.

Unter den kosmischen Einflüssen sind namentlich die der Erdbeben und der Himmelskörper zu verstehen. In vielen Erdbebenberichten wird mitgeteilt, daß ein Versiegen oder Nachlassen oder Steigern der Ergiebigkeit von Quellen beobachtet wurde. Messungen, die Knett während des vogtländisch-westböhmischen Erdbebens im Oktober--November 1897 an den Karlsbader Thermen anstellte, haben aber für diese die Unhaltbarkeit einer solchen Auffassung erwiesen. Es zeigte sich keinerlei Einwirkung auf die Quellen. Von Falb ist außerdem eine Beeinflussung des Mondstandes auf Quellwässer im Sinne von Gezeitenbildung zwar behauptet, aber nicht exakt bewiesen worden.

15. Das Aufsuchen von Quellen. Die Frage des Aufsuchens von Quellen, die von so großer praktischer Bedeutung ist, wird zurzeit nicht nur vom wissenschaftlichen Standpunkte aus behandelt, sondern ist in steigendem Maße der Gegenstand der Ausübung eines alten Glaubens. Mit einer Rutengabel, der Wünschelrute, ausgestattete Personen, denen besondere „Kräfte" oder Empfindungen zugeschrieben werden, sind der Ansicht, daß das unwillkürliche Ausschlagen der zumeist mit beiden Händen gehaltenen Rute Wasseradern im Boden anzeige. Th. Wegner faßte seine Erfahrungen über die Wünschelrute in die folgenden Leitsätze zusammen:

„Es ist nicht daran zu zweifeln, daß Bohrungen, deren Lage mit Hilfe der Wünschelrute festgestellt wurde, Erfolg hatten. Aber diese Erfolge entbehren jeglichen wunderbaren Charakters, beruhen keineswegs auf einer besonderen Kraft, die vom Wasser auf den Träger ausgeübt wird. Sie sind zurückzuführen: a) auf die allgemeine Verbreitung des Wassers in lockeren Materialien. In den meisten Teilen Norddeutschlands wird man stets Wasser finden; b) auf die Fähigkeit mancher Wünschelrutengänger, aus vorliegenden geologischen oder floristischen Beobachtungen richtige Schlüsse zu ziehen; c) zum kleinsten Teil auf Zufall.

Gegen die Annahme, daß von unterirdischen Wasseradern eine besondere Kraft ausgeübt wird, sprechen folgende Gründe: a) Wasseradern sind eine sehr große Seltenheit, nur im Gebirge treten sie häufiger auf. Die Wünschelrutengänger konstatieren aber überall „Adern", wo tatsächlich große Wasseransammlungen vorliegen. b) Weiterhin sprechen hiergegen die vielen Mißerfolge, die bei jedem Wünschelrutengänger nachgewiesen worden sind, die aber immer nur einen kleinen Teil der tatsächlich vorliegenden bilden. Diese Mißerfolge bestehen einmal darin, daß Wasser angezeigt wurde, aber nicht vorhanden war, sodann daß die Wünschelrute kein Wasser angab, aber doch solches sich vorfand.

Das Ausschlagen der Rute wird entweder bedingt durch absichtliche Handbewegungen (Täuschung) oder durch Autosuggestion oder durch unabsichtliche Bewegungen, herbeigeführt durch Erschlaffen der Arm- und Handmuskulatur oder Aenderung in der Oberflächenbeschaffenheit des von dem Rutengänger benutzten Weges. — Es erübrigt sich auf die große Wünschelrutenliteratur näher einzugehen.

Entsprechend den in den früheren Abschnitten wiedergegebenen Erscheinungsformen der Quellen in der Natur und ihrer Herkunft aus Sickerwässern lassen sich Prinzipien für das Aufsuchen von Quellen ableiten, von denen Keilhack eine Anzahl zusammenfaßt.

In Gegenden mit lockeren Gesteinsmassen, in denen Grundwasser strömt, ist einerseits die Terrainform, andererseits ein Wechsel in der Gesteinsbeschaffenheit dem Auftreten von Grundwasserquellen günstig. Wo ein Grundwasserstrom mit seiner Oberkante die Terrainoberfläche berührt, tritt am Schnittpunkte der beiden Linien das Wasser als Quelle zutage. Daher finden sich solche Quellen vorzugsweise an denjenigen Punkten des Talgehänges, „an denen die Höhenlinien dem Tale die konkave Seite zukehren, also im Innern flacherer oder tieferer Einbuchtungen des Gehänges. An solchen Stellen strömen die dem Haupttale zufließenden Grundwasser gegeneinander, finden in den erwähnten Terraineinbiegungen den für ihre Weiterbewegung erforderlichen Wasserquerschnitt nicht mehr und müssen deshalb zutage treten."

Bei Tälern in geschichteten Gesteinen unterscheidet Keilhack vier Fälle: 1. bei horizontalen Schichten ist der Austritt zahlreicher kleiner Quellen oberhalb von undurchlässigen Gesteinen zu erwarten; 2. in einem Tal mit einseitig geneigten Schichten ist die Seite, von der die Schichten abfallen,

quellenfrei (falls nicht durch irgendwelche Einflüsse ein Aufsteigen des Wassers verursacht wird), dagegen diejenige, zu der die Schichten einfallen, um so reicher an Quellen, je flacher die Schichtenneigung, je größer also das Einzugsgebiet ist; 3. in Synklinaltälern gilt letzteres für beide Seiten; 4. Antiklinaltäler (die höchstens aufsteigende Quellen führen) lassen absteigende nicht erwarten.

Wenn durchlässige Gesteine von undurchlässigen umhüllt werden, so kann sich in ihnen das Wasser stauen und an den Stellen zutage treten, an denen der Mantel zerstört ist.

Spalten und Verwerfungen, auf denen Wässer zirkulieren, sind oft von Erzgängen oder Eruptivgesteinsgängen ausgefüllt. An den Stellen, an denen diese Gänge zutage ausstreichen, sind oft Quellen reihenweise angeordnet. An Verwerfungen sind besonders dann Quellen zu erwarten, wenn sie undurchlässige gegen durchlässige Schichten legen. Doch bedarf es zum Auftreten der Quellen in einer solchen Lage nicht der Verwerfungen, es kann auch das Angrenzen stark zerklüfteter Eruptivgesteine gegen Tonschiefer genügen.

Treten an Berghalden Quellen zutage, so ist Aussicht, nach Abräumen des Schuttes aus anstehendem Gestein quillende Sickerwässer zu finden.

Wo Gehängemoore (d. h. Moore, deren hintere Seite sich flach an Gehänge lehnen, während die vordere gewöhnlich ziemlich steil abfällt), Kalk- und Eisenoxydsinter in Tälern vorhanden sind, kann man auf das Vorhandensein von Quellen schließen, deren Wasser zur Bildung der Gehängemoore Veranlassung gibt und als deren Absätze die Kalksinter und Eisenocker zu deuten sind.

Bei Tälern, die nicht in der Richtung des Gefälles in eine Hochfläche eingeschnitten sind, sondern rechtwinklig dazu, wird man Quellen eher auf der Seite erwarten dürfen, die das größere Infiltrationsgebiet hat als auf der mit dem kleineren.

In Norddeutschland ist allgemein die obere Grenze des unteren Geschiebemergels ein Quellniveau. Mit Hilfe der geologischen Spezialkarten sind hier leicht Quellen zu finden. Im Schwarzwald und den Vogesen treten sehr verbreitet Quellen an der Auflagerungsfläche des (wasserdurchlässigen) Buntsandsteins über dem (undurchlässigen) Granit oder kristallinen Schiefer auf. Im Schwäbischen und Fränkischen Jura sind die Impressamergel des weißen Jura und die Doggertone unter den Weißjurakalken sehr verbreitete Quellhorizonte, im Pariser Becken entsprechend die von zerklüfteten mitteloligocänen Sandsteinen und Kalken überlagerten unteroligocänen Mergel.

16. Ueber Quellenschutz und die Abgrenzung von Quellbereichen. Infolge der großen wirtschaftlichen Bedeutung der Quellen zur Wasserversorgung und zu Heil- und Kurzwecken ist in vielen Staaten durch besondere Gesetzgebung ein Schutz der Quellen vor jeder Schädigung hinsichtlich ihres Bestandes und ihrer Beschaffenheit eingerichtet. In geologischer Hinsicht kommen als derartige Schädigungen in Betracht: Störung des Nährgebietes oder Ableitung des Weges der Quellwässer. Im ersteren Falle können erhebliche Verluste an Wasser oder Mineralbestandteilen oder Einbrüche unerwünschter Massen (Verdünnung, Trübung, Verunreinigung) eintreten. Hauptsächlich bergbauliche Betriebe oder andere industrielle Unternehmungen bewirken in beiden Fällen die Schädigung. Zu deren Verhinderung ist es nötig, Quellbereiche abzugrenzen, die unter den besonderen gesetzlichen Schutz zu stellen sind.

Unter der Bezeichnung Quellbereich versteht S c h w a g e r alle die Punkte der Erdoberfläche bezw. der Erdkruste die für den Zuzug oder die Ableitung des Wassers der zu schützenden Quelle in Betracht kommen. Eine große Zahl von verschiedenen Faktoren ist bei der Umgrenzung von Quellbereichen zu berücksichtigen. Der Austrittspunkt von Fallquellen liegt am Rande des Nährgebietes, von Steigquellen dagegen im Zentrum. Temperatur des Quellwassers und sein Gehalt an gelösten Stoffen geben Auskunft über die Herkunft des Wassers; die Ergiebigkeit und ihr eventuelles Schwanken zeigen die mutmaßlichen Beziehungen zu den atmosphärischen Niederschlägen, zu Tagewässern, zum Grundwasser an. Vor allem ist eine genaue geologische Erforschung der Umgebung der Quelle in petrographischer, bodenkundlicher, stratigraphischer, tektonischer und morphologischer Hinsicht erforderlich, mit deren Hilfe die Durchlässigkeit, Wasseraufnahmefähigkeit und Verbreitung der Gesteine, der Aufbau der Landschaft, die Lage der Wasserscheide festzustellen sind. Es ist erforderlich, alle Punkte, die bei Fallquellen leitend mit dem Austrittspunkt, bei Steigquellen leitend mit dem Tiefenherd in Verbindung stehen können, aufzufinden. Sie stellen das Quellgebiet dar, das demnach bei Fallquellen ein anderes ist als bei Steigquellen.

Besonders bemerkenswert sind die Bestrebungen zum Schutze der durch Bergbau vielfach bedrohten, in sich aber auch infolge des starken Sprudelabsatzes relativ variablen Karlsbader Heilquellen, zu deren ständiger Ueberwachung außer einem k. k. Quelleninspektorat noch eine besondere Kommission von Fachgelehrten tätig ist.

17. Die chemisch-technische Einteilung der Quellen, besonders der Mineralquellen. Nach der Verwendung unterscheidet man unter den Quellwässern zwei große Gruppen: die gewöhnlichen, vielfach der Wasserversorgung dienenden Trink- und Gebrauchswässer, die sich durch mäßige Temperatur, mäßigen Gehalt an gelösten Stoffen und mäßige Härte auszeichnen und die Mineralwässer, die im allgemeinen größere Mengen von gelösten Stoffen oder seltener vorkommende enthalten oder Temperaturen über 20° besitzen. Die Verwendung zu Kur- und Heilzwecken haben den Mineralwässern eine hohe wirtschaftliche Bedeutung verliehen, die die Ursache zum Ausbau einer besonderen angewandten Wissenschaft, der Balneologie, geworden ist.

Auch in dieser angewandten Wissenschaft ist eine Einteilung der Quellen vorhanden, die sich einerseits der Temperaturverhältnisse, andererseits bestimmter Einzelbestandteile, denen man eine spezifische Wirkung zuschreibt, als Einteilungsprinzipien bedient. Das grundlegende Werk für die deutschen Mineralquellen und die diese betreffenden Wissenszweige ist das Deutsche Bäderbuch, in dem Hintz und Grünhut eine Einteilung nach den folgenden 9 Klassen — in Anlehnung an die längst eingebürgerten Bezeichnungen — vorgenommen haben:

I. Einfache kalte Quellen (Akratopegen).
II. Einfache warme Quellen (Akratothermen. Wildbäder).
III. Einfache Säuerlinge.
IV. Erdige Säuerlinge.
V. Alkalische Quellen.
VI. Kochsalzquellen.
VII. Bitterquellen.
VIII. Eisenquellen.
IX. Schwefelquellen.

I. Als einfache kalte Quellen sind unter 20° warme Quellwässer mit geringen Temperaturschwankungen und gleichbleibender Zusammensetzung des geringen Salzgehaltes zu bezeichnen. In 1 kg betragen die Mengen der freien Kohlensäure und der gelösten festen Bestandteile weniger als je 1 g. Sie stehen von den Mineralwässern den gewöhnlichen Brunnenwässern am nächsten. Vielfach sind es gewöhnliche Grundwasserquellen, die aus lockeren Aufschüttungen oder durchlässigen Sand- und Sandsteinschichten hervortreten. Es sind auch Kalk- und Granitwässer darunter, die zum Teil Spalt-, zum Teil Kluftwässer genannt werden müssen. In der Mehrzahl sind es der chemischen Einteilung nach Carbonat- oder Carbonat-Chlorid-Wässer mit vorwiegendem Natrium und Kalzium oder Natrium oder Calcium.

Als Beispiel sei das Carbonatwasser mit vorwiegendem Calcium der Hermannsquelle von Mölln in Lauenburg wiedergegeben, eine Grundwasser- und zwar Sandquelle. Sie liefert täglich etwa 70 hl Wasser von 9 bis 10°.

In 1 kg Wasser sind enthalten:

Anionen	Gramm	Milligramm-Aequivalente
NO_3'	0,000356	0,0057
Cl'	0,01294	0,3652
SO_4''	0,01332	0,2774
HPO_4''	0,000582	0,0121
HCO_3'	0,2183	3,578
		4,238
Kationen		
Na'	0,007422	0,3220
K'	0,003210	0,0820
Ca''	0,06700	3,341
Mg''	0,005120	0,4203
Fe''	0,001103	0,0395
Mn''	0,000609	0,0221
Al'''	0,000103	0,0114
	0,3301	4,238
Anionen		
H_2SiO_3	0,001855	
CO_2	0,1431	
	0,4750	

Das Mineralwasser entspricht in seiner Zusammensetzung ungefähr einer Lösung, welche in 1 kg enthält:

	Gramm
KNO_3	0,000580
KCl	0,005688
$NaCl$	0,01690
Na_2SO_4	0,002351
$CaSO_4$	0,01663
$CaHPO_4$	0,000049
$Ca(HCO_3)_2$	0,2510
$Mg(HCO_3)_2$	0,03076
$Fe(HCO_3)_2$	0,003510
$Mn(HCO_3)_2$	0,001960
$Al_2(HPO_4)_3$	0,000650
H_2SiO_3	0,001855
CO_2	0,1431
	0,4750

II. An Wildbädern hat Deutschland 8 aufzuweisen und zwar Warmbrunn (24,5 bis 43,1°), Wildbad (34,5 bis 39,5°), Wildbad-Trarbach und Wildstein (35°), Bodendorf (32°), Schlangenbad (28 bis 31°), Warmbad (29°), Badenweiler (26,4°), Wiesenbad (20,2°). Es sind bis auf eines Spalt- und Kluftquellen und zumeist Granitwässer, auch mehrere Phyllitwässer. Das Badenweiler Wasser entspringt aus verkieseltem Muschelkalk an der Grenze des Keupers nahe dem Urgebirge und ist eine Schichtquelle mit Kalkwasser. Die übrigen enthalten vorwiegend Carbonate von Natrium, Calcium, bisweilen Magnesium, Sulfat oder Chlorid von Natrium, Kieselsäure. Auch bei den Wildbädern beträgt die Menge der Kohlensäure und der gelösten festen Substanzen in 1 kg weniger als je 1 g.

Als Beispiel diene die Analyse einer

Mischung von 10 Granitspaltwässern von Wildbad mit 36° im Mittel. Die zahlreichen Quellen liefern zusammen täglich 10000 hl.

Anionen	Gramm	Milligramm-Aequivalente
Cl'	0,1500	4,230
SO_4''	0,03614	0,7525
HCO_3'	0,2449	4,014
		8,997
Kationen		
Na'	0,1500	6,506
K'	0,008584	0,2193
Li'	0,000853	0,1183
Ca''	0,03689	1,840
Mg''	0,003368	0,2765
Fe''	0,000190	0,0068
Al'''	0,000270	0,0299
	0,6312	8,997
Anionen		
H_2SiO_3	0,07886	
CO_2	0,0269	
N_2	0,02327	
O_2	0,000806	
	0,7610	

Ferner Spuren Cs, Rb, NH_4, Sr, Ba, Mn, Sn, NO_3', HPO_4'', $HAsO_4''$, B_4O_7'', organ. Subst.

Das Mineralwasser entspricht in seiner Zusammensetzung ungefähr einer Lösung, welche in 1 kg enthält:

	Gramm
KCl	0,01636
NaCl	0,2346
Na_2SO_4	0,05136
$NaHCO_3$	0,1490
$LiHCO_3$	0,008052
$Ca(HCO_3)_2$	0,1491
$Mg(HCO_3)_2$	0,02024
$Fe(HCO_3)_2$	0,000605
$Al_2(SO_4)_3$	0,001709
H_2SiO_3	0,07886
CO_2	0,0269
N_2	0,02327
O_2	0,000806
	0,7609

III. Die **einfachen Säuerlinge** haben mehr als 1 g Kohlensäure, aber weniger als 1 g fester Bestandteile. Es sind selten vorkommende Sand-, Granit-, Kalk-, Schieferwässer, die ihren Kohlensäuregehalt zum Teil wohl erloschenen vulkanischen Eruptionen verdanken könnten. Als Carbonatwässer enthalten sie Natron, Kalk, Magnesia überwiegend; bezw. hauptsächlich Kalk. In geologischer Hinsicht sind es Grundwasser-, Schichtfugen-, Kluft- und Spaltquellen.

IV. Weit zahlreicher sind die **erdigen Säuerlinge**. Sie enthalten in 1 kg mehr als 1 g Kohlensäure und mehr als 1 g fester Bestandteile, und zwar vorherrschend Kalk- und Magnesiumcarbonat. Auch Natronsalze sind vielfach reich vorhanden, bisweilen Gips, zumeist sind es Sand-, Schiefer- und Kalkwässer; auch einige Basaltwässer gehören hierher. Der Kohlensäuregehalt ist zumeist vulkanisch, gelegentlich auch humos. Die Quellen von Rehburg, Selters, Tönnisstein und Wildungen gehören hierher.

V. Die **alkalischen Quellen** enthalten mehr als 1 g fester Bestandteile im Liter und zwar vorwiegend Alkali- speziell Natriumcarbonate. Die Wässer reagieren nach dem Kochen infolge des Verlustes dei Kohlensäure alkalisch. Bei Anwesenheit von mehr als 1 g CO_2 spricht man von alkalischen Säuerlingen. Uebersteigt die Temperatur 20°, so haben wir alkalische Thermen. Tritt der Gehalt an Chloriden, Sulfaten, oder der an Erdalkalien mehr in den Vordergrund, so hat man alkalisch-muriatische, alkalisch-salinische, alkalisch-erdige usw. Wässer. Die Mehrzahl dieser Quellen — es sind über 2 Dutzend genannt — treten im Rheinischen Schiefergebirge aus Fugen und Spalten in Tonschiefern und Grauwacken zutage. Es sind Steigquellen zumeist mit Schieferwasser, dem gelegentlich Solwasser beigemischt zu sein scheint. Der Kohlensäuregehalt ist oft vulkanisch.

Hierher gehören die bekanntesten Tafelwässer, wie die des Apollinarisbrunnens, von Birresborn, Ems, Fachingen, Gerolstein, Hönningen, Namedy, Neuenahr, Nieder- und Oberselters, Rhens, Roisdorf usw.

Es sei die Analyse des Fachinger Wassers, eines alkalischen Säuerlings, wiedergegeben, das aus Schichtfugen unterdevonischen Tonschiefers zutage tritt. Es ist ein echtes, vadoses Schieferwasser mit zum Teil vulkanischer Kohlensäure. Die Quelle hat wechselnde Ergiebigkeit und eine Temperatur von 10,1 bis 11,2°.

Anionen	Gramm	Milligramm-Aequivalente
Cl'	0,4022	11,35
Br'	0,000189	0,0024
J'	0,000008	0,00007
SO_4''	0,02631	0,5479
HCO_3'	4,009	65,71
NO_3'	0,000704	0,0113
		77,62
Kationen		
Na'	1,348	58,50
K'	0,04243	1,084
Li'	0,000863	0,1227
NH_4'	0,000519	0,0287
Ca''	0,1740	8,676
Sr''	0,001843	0,0421
Ba''	0,000171	0,0025
Mg''	0,1095	8,987
Fe''	0,001826	0,0653
Mn''	0,003031	0,1102
	6,121	77,62

Anionen	
HBO_2	0,000355
H_2SiO_3	0,03310
CO_2	1,784
	7,938

Daneben Spuren von Rb, CO, Ni, Al, Fl, PO_4H_2', organische Substanz, Stickstoff.

Das Mineralwasser entspricht in seiner Zusammensetzung ungefähr einer Lösung, die in 1 kg enthält:

	Gramm
KNO_3	0,001148
KCl	0,08001
NaCl	0,5994
NaBr	0,000244
NaJ	0,000010
Na_2SO_4	0,03894
$NaHCO_3$	4,010
$LiHCO_3$	0,008351
NH_4Cl	0,001537
$Ca(HCO_3)_2$	0,7033
$Sr(HCO_3)_2$	0,00441
$Ba(HCO_3)_2$	0,000322
$Mg(HCO_3)_2$	0,6577
$Fe(HCO_3)_2$	0,005813
$Mn(HCO_3)_2$	0,009756
HBO_2	0,000355
H_2SiO_3	0,03310
	6,154
CO_2	1,784
	7,938

100 ccm des Quellgases enthalten 980,4 ccm CO_2 und 19,6 ccm N.

VI. In den **Kochsalzquellen** (**muriatischen Quellen**) überwiegen bei mehr als 1 g gelöster fester Stoffe unter den Anionen die Cl'-, unter den Kationen die Na'-Ionen. Einfache Kochsalzquellen sind von Kochsalzsäuerlingen mit mehr als 1 g CO_2 im Liter zu unterscheiden. Uebersteigt die Quelltemperatur 20°, so haben wir Kochsalzthermen. Die hierhergehörigen Quellen sind in Deutschland mit seinen großen Salzvorkommen außerordentlich häufig. Es sind zumeist Steigquellen mit Solwasser. Vielfach treten sie auf den Randverwerfungen alter Gebirgsrümpfe gegen die jüngeren Vorlandgesteine auf, in welch letzteren die Salzlager zu suchen sein dürften. So Badbronn-Kestenholz an den Vogesen; Säckingen, Rothenfels, Baden-Baden am Schwarzwald; Harzburg am Harz; Nauheim, Soden am Taunus, Rosbach, Homburg vor der Höhe, Kronthal, Kiedrich, Wiesbaden, Aßmannshausen, Kreuznach, Münster am Stein an der südlichen Randverwerfung des rheinischen Schiefergebirges. Die an den Randgebirgen der oberrheinischen Tiefebene, Vogesen, Schwarzwald, rheinisches Schiefergebirge, gelegenen könnten ihren Solgehalt der Auslaugung der tertiären elsässischen Salzlager verdanken.

Die Friedrichsquelle von Baden-Baden (62,8°; aus 4 Quellen 3402 hl in 24 Stunden) und der Kochbrunnen von Wiesbaden (65,7°; 5472 hl in 24 Stunden) enthalten:

		F		K	
		Gramm	Milligramm Aequivalente	Gramm	Milligramm Aquivalente
Anionen:	Cl'	1,365	38,50	4,656	131,3
	Br'	0,004095	0,0512	0,003374	0,0422
	J'	—	—	0,000017	0,0001
	SO_4''	0,1557	3,242	0,06243	1,30
	NO_3'	—	—	0,001824	0,0294
	HPO_4''	0,000138	0,0029	0,000026	0,0005
	$HAsO_4''$	0,000455	0,0065	0,000168	0,0024
	HCO_3'	0,1541	2,525	0,562	9,21
			44,33		141,9
Kationen:	Na'	0,7967	34,56	2,692	116,8
	K'	0,06906	1,764	0,09654	2,466
	Li'	0,009619	1,368	0,003758	0,5345
	Li'	0,009919	1,368	0,003758	0,5345
	NH_4'	—	—	0,006304	0,3488
	Ca''	0,1222	6,096	0,3462	17,27
	Sr''	0,002128	0,0486	0,01248	0,2850
	Ba''	—	—	0,000568	0,0097
	Mg''	0,004791	0,3933	0,04984	4,092
	Fe''	0,000698	0,0250	0,003317	0,1187
	Mn''	0,001624	0,0591	0,000583	0,0112
	Cs'	0,001021	0,0077	—	—
		2,687	44,32	8,498	141,1
Anionen:	HBO_2	—	—	0,003428	—
	H_2SiO_3	0,1650	—	0,08567	—
	H_2TiO_3	—	—	0,000007	—
	CO_2	0,0180	—	0,309	—
			2,870	8,896	

Spur Rb und organische Substanz. 1000 ccm des der Quelle entströmenden Gases enthalten
CO_2 168 bezw. 202 ccm } dazu
N 832 „ 798 ccm } Spuren O.

Die Mineralwasser entsprechen ungefähr Lösungen, die in 1 kg enthalten:

	Gramm F	Gramm K
KNO_3	—	0,002975
KCl	0,1316	0,1818
NaCl	2,019	6,829
NaBr	0,005276	0,004247
NaJ	—	0,000020
LiCl	0,05812	0,02271
CsCl	0,001293	—
NH_4Cl	—	0,01867
$CaCl_2$	0,04695	0,6260
$CaSO_4$	0,2207	0,08849
$CaHPO_4$	0,000195	0,000036
$CaHAsO_4$	0,000585	0,000216
$Ca(HCO_3)_2$	0,1620	0,3797
$Sr(HCO_3)_2$	0,005092	0,02987
$Ba(HCO_3)_2$	—	0,001262
$Mg(HCO_3)_2$	0,02879	0,2995
$Fe(HCO_3)_2$	0,002223	0,01056
$Mn(HCO_3)_2$	0,005226	0,001875
HBO_2	—	0,003428
H_2SiO_3	0,1650	0,08567
H_2TiO_3	—	0,000007
	2,852	8,586
CO_2	0,0180	0,309

Die Baden-Badener Quelle führt also eine wesentlich dünnere Lösung als der Kochbrunnen. Auch ist die Zusammensetzung eine andere. Diese enthält etwa 80% NaCl, jene 69%; dafür jene 4,6% KCl; 0,18% NaBr; 9% $CaCl_2 + CaSO_4$; dagegen diese 3% KCl; 0,04% NaBr; 7% $CaCl_2 + CaSO_4$.

VII. Die viel selteneren **Bitterquellen** sind durch das Vorwalten der Sulfationen charakterisiert. Sie enthalten mehr als 1 g Festes im Liter gelöst. Auch diese Wässer fallen unter den oben abgeleiteten chemisch-genetischen Begriff der Solwässer; sie verdanken der Auslaugung von Gipslagern ihren Gehalt. Meist sind es Schichtfugen-, zum Teil Steigquellen.

Die Arminiusquelle von Lippspringe ist eine Erdfallquelle nach Art der des Hainich (s. S. 13). Sie hat 20,8° und eine Ergiebigkeit von 259 hl in 24 Stunden. In 1 kg Wasser ist enthalten:

Anionen	Gramm	Milligramm-Aequivalente
Cl'	0,1914	5,398
SO_4''	1,048	21,82
HCO_3'	0,6390	10,47
NO_3'	0,0068	0,11
		37,80
Kationen		
Na'	0,1588	6,889
K'	0,0127	0,324
Ca''	0,4937	24,62
Mg''	0,07204	5,915
Fe''	0,0015	0,053
	2,624	37,80
Anionen		
CO_2	0,2473	
	2,871	

Das Mineralwasser entspricht ungefähr einer Lösung, die im kg enthält:

KNO_3	0,011
KCl	0,0159
NaCl	0,3033
Na_2SO_4	0,1212
$CaSO_4$	1,370
$Ca(HCO_3)_2$	0,3653
$Mg(HCO_3)_2$	0,4329
$Fe(HCO_3)_2$	0,0047
	2,624

1000 ccm des der Quelle entströmenden Gases enthalten 130,5 ccm CO_2, 869,5 ccm N, Spuren von Kohlenwasserstoffen.

Auch hier entstammt die Kohlensäure wie beim Wiesbadener Kochbrunnen der Luft.

VIII. Als **Eisenquellen** werden solche bezeichnet, die mehr als 0,010 g Ferro- oder Ferriionen im Liter enthalten. Ist das Eisen an Schwefelsäure gebunden, so spricht man von Vitriolquellen; an Kohlensäure gebunden ist es in den Eisencarbonat- oder Stahlquellen vorhanden. Tritt daneben freie Kohlensäure auf, so hat man Eisensäuerlinge. Im übrigen können die Eisencarbonatquellen die Bestandteile aller anderen Gruppen enthalten, so daß man von reinen, erdigen, alkalischen, muriatischen usw. Eisencarbonatquellen spricht. Sehr verschieden ist auch die Herkunft der Wässer. Die reinen Eisensäuerlinge von Alexanderbad sind gehaltarme Schieferquellen. Die gehaltarme reine Vitriolquelle von Alexisbad dürfte der Zersetzung von Eisenkies in der Grauwacke ihren Eisensulfatgehalt verdanken. Die Quellen von Augustusbad in Sachsen sind zum Teil arme Granitwässer mit etwas Luftkohlensäure. Die alkalisch-muriatisch-salinische Eisencarbonatquelle des Augustusbrunnens von Berggießhübel ist ein gehaltreiches Erzwasser. Die Stahlquelle von Doberan, die Quellen von Driburg sind Grundwasserquellen. Zu Bocklet entspringen Stahlbrunnen als Spaltwasserquellen. Die gehaltarme, nur an Eisencarbonat reiche rote Flußquelle von Hermsdorf an der Katzbach ist eine Moorquelle. Ein Diabaswasser ist der Höllensprudel bei Bad Steben. Die zum Teil freie Schwefelsäure führenden Vitriolquellen von Lausigk sind Braunkohlenwässer. Buntsandsteinwässer sind häufig Eisenquellen.

IX. Die **Schwefelquellen** enthalten freien Schwefelwasserstoff neben Sulfidionen. Es sind Thermen, reine, erdige, alkalische usw. Schwefelquellen vorhanden. Auch hier schwankt die Zusammensetzung, die Herkunft, das Auftreten stark. Die heißen Aachener Steigquellen müssen einen tiefen Ursprung, jedoch nicht vulkanischer Natur, haben. Die Abbacher Quelle ist eine Schichtfugenquelle auf der Grenze von Jura und Kreide; das Wasser soll aus Braunkohle im

Miocän über der Kreide herrühren. Zu Boll entspringt eine Schichtfugenquelle aus bituminösen Schiefern. Aehnlichen Ursprungs sind die Quellen aus dem Wealdentonschiefer von Bentheim und Eilsen. Die Quelle von Faulenbach bei Füssen entstammt moorigen Letten. Moorwasser führen auch die von Fiestel in Westfalen, Braunkohlenwasser die von Gögging und Höhenstadt i. Niederbayern. Die warmen reinen Schwefelquellen von Landeck sind Steigquellen mit gehaltarmem Granit-(Gneiß-)wasser. Dem Gipslager des mittleren Keupers entspringt die an organischer Substanz reiche sulfatische Schwefelquelle von Langensalza. Aus Schwefelkieslagern stammt der Schwefelwasserstoff der Tiefenbacher Quelle.

Literatur. **G. Bischof**, *Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie, I. Bd., II. Aufl. 1863.* — **F. W. Clarke**, *Data of Geochemistry, II. Aufl., 1911, N. S. G. S. Bull. 491.* — **A. Daubrée**, *Les eaux souterraines. 1887.* — **Deutsches Bäderbuch**, *Leipzig 1907.* — **H. Haas**, *Quellenkunde, 1885.* — **A. Heim**, *Die Quellen, Basel 1885.* — **K. Keilhack**, *Lehrbuch der praktischen Geologie, II. Aufl. 1911.* — **B. M. Lersch**, *Hydrochemie, 1864.* — **Derselbe**, *Handbuch der Hydrophysik, 1870.* — **O. Lueger**, *Die Wasserversorgung der Städte, 1908.* — **J. Roth**, *Allgemeine und chemische Geologie, I. Bd., 1879.* — **H. B. Woodward**, *The Geology of Water Supply, London 1910.*

H. Stremme.

Quenstedt
Friedrich August.

Geboren am 9. Juli 1809 in Eisleben, wurde er als Waise von seinem Oheim, einem Schullehrer in Meisdorf, erzogen. Seit dem Jahre 1830 studierte er in Berlin Naturwissenschaften und wurde nach seiner Promotion Assistent an der Mineralogisch-Geologischen Sammlung. 1837 ging er als Professor für Mineralogie, Geologie und Paläontologie nach Tübingen, wo er sich bald in erfolgreichster Weise um die Geologie Schwabens verdient machte, so daß er den Beinamen Praeceptor Sueviae erhielt. Er gründete eine vortreffliche Unterrichts- und Lokalsammlung. Eine große Zahl hervorragender Geologen zählt sich zu seinen Schülern. Seine originelle Persönlichkeit ließ ihn seine eigenen Wege in der Forschung einschlagen, unbekümmert um die Arbeiten anderer Fachgenossen. Er starb am 21. Dezember 1889 in Tübingen.

Das Hauptverdienst Quenstedts ist die geologische Erforschung der Juraformation Schwabens, die er in 18 Stufen einteilte mit einer bis ins einzelnste gehenden Genauigkeit. Bereits 1843 erschien von ihm „Das Flötzgebirge Württembergs“ (Tübingen, 2. Aufl., 1851), das vor allem den Juraablagerungen gewidmet war. „Der Jura“ (Tübingen 1857) war sein Hauptwerk. Kurz vor seinem Tode bearbeitete er in einem großen Tafelwerk die „Ammoniten des schwäbischen Jura“ (Stuttgart, 1885 bis 1888, 3 Bde.). Weitere Werke von ihm sind das Handbuch der Petrefaktenkunde (Stuttgart 1851, 3. Aufl., 1882 bis 1885) und die Petrefaktenkunde Deutschlands (Tübingen und Leipzig, 1849 bis 1884, 7 Bde.); auch auf mineralogischem Gebiete arbeitete er im Sinne der Anschauungen seines Lehrers Weiß. Die Ergebnisse seiner mineralogischen Forschertätigkeit sind: Methode der Kristallographie (Tübingen 1840); Handbuch der Mineralogie (das. 1854, 3. Aufl. 1877); Grundriß der bestimmenden und rechnenden Kristallographie (das. 1873).

Literatur. **Oskar Fraas**, *Friedrich August Quenstedt, N. Jahrb. f. Min. usw. 1890, I, Nekrologe.* — **A. Rothpletz**, *Fr. Aug. Quenstedt, Allgem. Deutsche Biographie, Bd. 53, S. 179 bis 180.*

O. Marschall.

R.

Rädertiere,

eine der Hauptgruppen der Würmer, durch die Bewimperung des vorderen Körperteils (Räderapparat) ausgezeichnet; sehr kleine im Süßwasser und Meer lebende Tiere (vgl. den Artikel „Rotatorien").

Radikale.

1. Einleitung. Die Konstitution der Moleküle. 2. Der Radikalbegriff Lavoisiers. 3. Der eigentliche Radikalbegriff. Radikal- und Typentheorie. 4. Die Grenzen der Radikaltheorie. Weiterentwickelung. Atomverkettung. Stereochemie.

1. Einleitung. Die Konstitution der Moleküle. Bei der Ermittelung der Zusammensetzung einer chemischen Verbindung wie z. B. der Benzoësäure spielt die Art der Elemente (C, H, O), das Atomverhältnis ($C_7H_6O_2$), die Molekulargröße $(C_7H_6O_2)_x$, wobei für x-Werte von 1, 2, 3 und höhere in Betracht kommen, und die Frage nach der rationellen Zusammensetzung oder Konstitution (siehe den Artikel „Konstitution"), d. h. der Art der Lagerung oder Gruppierung der Atome im Moleküle, eine Rolle. Bei dem Suchen nach einer Antwort auf die letzte Frage herrschte zunächst die Idee vor, aus den Produkten der Zersetzung einer Verbindung einen Schluß zu ziehen. Die Verbrennungserscheinungen traten dabei in den Vordergrund, und seitdem Lavoisier (1743 bis 1794) den Sauerstoff als das bei der Verbrennung wirksame Element erkannt hatte, galt bei allen Untersuchungen der Verbindungen das Hauptinteresse diesem Element.

2. Der Radikalbegriff Lavoisiers. Der mit dem Sauerstoff verbundene Rest trat in den Hintergrund, er erhielt den Namen la base, le radical. Lavoisier nennt den Stickstoff das Radikal der Salpetersäure, den Kohlenstoff das der Kohlensäure. Er überträgt diese dualistischen Anschauungen auf die organische Chemie, spricht von einem „radical oxalique, malique, tartareux" und versteht darunter den Teil der Verbindung, der zusammen mit dem Sauerstoff die Säure ausmacht.

3. Der eigentliche Radikalbegriff. Radikal- und Typentheorie. Die Arbeiten von Gay-Lussac über das Cyan —CN (1875), von Liebig und Wöhler über das Benzoyl $—C_6H_5.CO$ (1832) und von Bunsen über das Kakodyl $—As(CH_3)_2$ (1839) lassen den Wert der Radikale für das Problem der rationellen Zusammensetzung organischer Verbindungen erkennen und schaffen für den Begriff der Radikale die Auffassung, daß Radikale Atomgruppierungen sind, die 1. sich ähnlich (aber nicht gleich) wie Elementaratome bei einer größeren Anzahl von bestimmten chemischen Umsetzungen unverändert von einer Verbindung in eine andere übertragen lassen, 2. bei gewissen anderen Reaktionen aber eine Veränderung erleiden können.

1. Das Radikal Benzoyl C_7H_5O bildet einen Bestandteil der Moleküle folgender Verbindungen: das Bittermandelöl oder der Benzaldehyd C_7H_6O gibt durch Oxydation die Benzoësäure $C_7H_6O_2$; aus ihr bildet sich mittels Chlorphosphors das Benzoylchlorid C_7H_5OCl, das durch Reduktion, indem das Chloratom durch ein Wasserstoffatom ersetzt wird, Benzaldehyd gibt und durch Austausch des beweglichen Cl-Atoms

gegen OH	bei der Behandlung mit	HOH	Benzoësäure	$C_7H_6O_2$
„ NH_2	„ „ „ „	HNH_2	Benzamid	C_7H_7ON
„ CN	„ „ „ „	HCN	Benzoylcyanid	C_8H_5ON bildet.

Es können hiernach:

1. der Benzaldehyd	$C_6H_5CO.H$	als das Hydrid	der Benzoyls C_6H_5CO aufgefaßt werden
2. das Benzoylchlorid	$C_6H_5CO.Cl$	„ „ Chlorid	
3. die Benzoësäure	$C_6H_5CO.OH$	„ „ Hydroxyd	
4. das Benzamid	$C_6H_5CO.NH_2$	„ „ Amid	
5. das Benzoylcyanid	$C_6H_5CO.CN$	„ „ Cyanid	

In den Verbindungen 3 und 4 begegnen wir den unorganischen Radikalen: Hydroxylgruppe —OH und Amidogruppe $-NH_2$, die wie das Sulfuryl —SH, die Imidogruppe =NH, die Nitrogruppe $-NO_2$ und die Nitrosogruppe —NO in der anorganischen und organischen Chemie von Bedeutung sind.

2. Bei Betrachtung der Beziehungen der Benzoësäure zu noch anderen Verbindungen als zu denen der obigen Reihe finden wir ihr auch das Radikal Phenyl C_6H_5 eigen. Spaltet man nämlich aus der Benzoësäure Kohlendioxyd ab, so entsteht Benzol C_6H_6 oder Phenylhydrid, aus dem über das Nitrobenzol $C_6H_5NO_2$, Anilin oder Phenylamin $C_6H_5NH_2$ und Benzonitril oder Phenylcyanid C_6H_5CN die Benzoësäure oder Phenylcarbonsäure wiedergewonnen werden kann.

In dieser Reihe von Verbindungen ist das Phenyl der unverändert übertragbare Bestandteil.

Die Befunde unter den Gesichtspunkten 1. und 2. sind für die Ermittelung der Konstitutionsfrage von großer Wichtigkeit, vermögen aber die Frage nicht zu lösen, und so ist heute die Erkenntnis der Radikale nicht mehr wie einst in der Zeit der Radikaltheorie (etwa von 1830 bis 1845), in der man die organische Chemie als Chemie der zusammengesetzten Radikale bezeichnete, das letzte Ziel der Konstitutionsermittelungen.

Die Radikaltheorie mit ihren Beziehungen zwischen Verbindungen mit gleichem Radikal aber von abweichendem chemischem Charakter ging in der Typentheorie (etwa von 1848 bis 1858) auf, in der Gerhardt den Zusammenhang zwischen Verbindungen mit verschiedenen Radikalen aber ähnlichem chemischem Charakter kennen lehrte.

Zunächst wurden die vier Typen:

Wasserstoff	Chlorwasserstoff	Wasser	Ammoniak
$\left.\begin{matrix}H\\H\end{matrix}\right\}$	$\left.\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix}\right\}$	$\left.\begin{matrix}H\\H\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}H\\H\\H\end{matrix}\right\}N$

aufgestellt.

Auf den Typus Wasserstoff bezog man die Kohlenwasserstoffe: $\left.\begin{matrix}C_2H_5\\H\end{matrix}\right\}$ Aethylwasserstoff; $\left.\begin{matrix}C_2H_5\\CH_3\end{matrix}\right\}$ Methyläthyl.

Zum Typus Chlorwasserstoff zählten die Halogenalkyle, die Säurechloride, die Nitrile:

$\left.\begin{matrix}C_2H_5\\Cl\end{matrix}\right\}$ Aethylchlorid; $\left.\begin{matrix}C_7H_5O\\Cl\end{matrix}\right\}$ Benzoylchlorid; $\left.\begin{matrix}C_6H_5\\CN\end{matrix}\right\}$ Benzonitril.

Vom Typus Wasser leiteten sich die Alkohole, Säuren, Säureanhydride und Ester ab:

$\left.\begin{matrix}C_2H_5\\H\end{matrix}\right\}O$ Aethylalkohol; $\left.\begin{matrix}C_7H_5O\\H\end{matrix}\right\}O$ Benzoësäure; $\left.\begin{matrix}C_7H_5O\\C_7H_5O\end{matrix}\right\}O$ Benzoësäureanhydrid; $\left.\begin{matrix}C_7H_5O\\C_2H_5\end{matrix}\right\}O$ Benzoësäureäthylester.

Der Typus Ammoniak umfaßte die Amine und Säureamide:

$\left.\begin{matrix}C_2H_5\\H_2\end{matrix}\right\}N$ Aethylamin und $\left.\begin{matrix}C_7H_5O\\H_2\end{matrix}\right\}N$ Benzamid.

Kekulé fügte den Typus $\left.\begin{matrix}H\\H\\H\\H\end{matrix}\right\}C$ „Grubengas" hinzu (vgl. den Artikel „Chemische Typen").

4. Die Grenzen der Radikaltheorie. Weiterentwickelung. Atomverkettung. Stereochemie. Einzelne Isomeriefälle konnte aber die Typentheorie nicht erklären, wie die dem Typus Wasser angehörenden Verbindungen

$\left.\begin{matrix}C_3H_7\\H\end{matrix}\right\}O$ und $\left.\begin{matrix}C_3H_7\\H\end{matrix}\right\}O$

Propylalkohol Isopropylalkohol.

Das Zurückgehen bis auf die einzelnen Elementaratome ließ daher den Wert der Erkenntnis der Radikale geringer erscheinen und führte zur Atomverkettungstheorie, die sich dann bis zur Lehre der räumlichen Molekülkonfiguration oder Stereochemie entwickelte.

Literatur. *A. Kekulé, Lehrbuch der organischen Chemie. — A. Ladenburg, Entwickelungsgeschichte der Chemie. Braunschweig 1902. — E. v. Meyer, Geschichte der Chemie. Leipzig 1905. — Meyer-Jacobson, Lehrbuch der organischen Chemie. Leipzig 1907.*

F. A. Kötz.

Radioaktivität.

1. Einleitung. 2. Meßmethoden. 3. Eigenschaften der Strahlen. 4. Radioaktive Umwandlungen des Urans; Theorie des Atomzerfalles. 5. Umwandlungsreihe des Radiums. 6. Chemische und physikalische Eigenschaften der Radiumemanation. 7. Erzeugung von Helium und Wärmeentwickelung radioaktiver Stoffe. 8. Zahl der

α-Partikeln. 9. Zusammenhang zwischen Uran und Radium. 10. Umwandlungsreihe des Aktiniums. 11. Umwandlungsreihe des Thoriums. 12. Uebersicht über die radioaktiven Elemente; Alter radioaktiver Mineralien; Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Wärmehaushalt der Erde.

1. **Einleitung.** 1a) Definition. Als radioaktiv bezeichnet man eine Reihe von Stoffen, die spontan und unabhängig von äußeren Einflüssen Strahlen aussenden, welche die Luft und andere Gase elektrisch leitend machen, auf die photographische Platte einwirken und Fluoreszenz zu erregen vermögen.

Bei einer Reihe von chemischen Prozessen, z. B. der Oxydation des Phosphors, der Hydratation des Chininsulfats, bei der Bestrahlung gewisser Metalle mit ultraviolettem Licht kann man eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit der Luft beobachten; Zink, Aluminium und einige organische Substanzen vermögen auf die photographische Platte einzuwirken. Alle diese Erscheinungen sind jedoch nicht unabhängig von dem chemischen Zustande der Stoffe, von der Temperatur und anderen physikalischen Bedingungen der Strahlungsquelle und sie treten nicht spontan auf, sondern als Wirkungen einer äußeren Ursache. Diese Vorgänge fallen daher nicht unter den Begriff der radioaktiven Prozesse.

1b) Entdeckung der Radioaktivität. Die Erscheinung der Radioaktivität ist im Februar des Jahres 1896 von Henri Becquerel entdeckt worden. Becquerels Untersuchungen knüpfen an die kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen aufgeworfene Frage an, ob die Aussendung der Röntgenstrahlen mit der durch die Kathodenstrahlen erzeugten Fluoreszenz im Zusammenhang stünde, und ob daher Substanzen, die unter dem Einfluß des Lichtes fluoreszieren, Röntgenstrahlen aussenden. Dieser Idee folgend, fand Becquerel, daß das phosphoreszierende Uranylkaliumsulfat durch schwarzes Papier hindurch starke photographische Wirkungen auszuüben vermag. Die Fortsetzung der Versuche lehrte bald, daß die Aussendung der durchdringenden Strahlen mit der Phosphoreszenz in keinerlei Zusammenhang steht. Das Präparat brauchte nicht belichtet gewesen zu sein, um auf die photographische Platte zu wirken, und die Fähigkeit, die photographische Platte zu schwärzen, fand sich bei allen, auch den nicht phosphoreszierenden Verbindungen des Urans und bei dem Metall selbst wieder. Die Intensität der von verschiedenen Uranpräparaten bewirkten Schwärzung war stets von der gleichen Größenordnung und wesentlich durch die Menge des vorhandenen Urans bestimmt. Die Strahlung änderte sich nach Quantität und Qualität nicht in merklicher Weise mit der Zeit und zeigte sich unabhängig von äußeren Umständen, wie Aenderung der Temperatur, Bestrahlung der Uranverbindungen mit ultraviolettem Licht oder Röntgenstrahlen usw.

Das Strahlungsvermögen des Urans und seiner Verbindungen erwies sich, wie weiterhin durch eine eingehende Untersuchung von Mme. Curie bestätigt wurde, als eine spezifische Eigenschaft des Elements Uran, als eine atomistische Eigenschaft.

1c) Uebersicht über die radioaktiven Elemente. Von den zur Zeit der Entdeckung der Radioaktivität bekannten chemischen Elementen besitzt nur noch das Thorium die Fähigkeit, Strahlen von ähnlicher Intensität wie das Uran auszusenden (G. C. Schmidt, Mme. Curie, 1898). Die von Campbell und Wood (1906) entdeckte Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums beträgt nur etwa den 1000. Teil der Aktivität des Urans. Bei den übrigen gewöhnlich vorkommenden Elementen ist, wie eine systematische nach der photographischen Methode ausgeführte Untersuchung von Levin und Ruer gezeigt hat, eine Radioaktivität nicht nachweisbar. Ist eine solche vorhanden, so ist sie jedenfalls noch sehr viel geringer als die des Kaliums.

Die radioaktive Forschung hat jedoch eine Schar von etwa 30 neuen radioaktiven Elementen kennen gelehrt, die sich alle entweder dem Uran oder dem Thorium als „Zerfallsprodukte" zuordnen lassen. Von diesen seien hier die bekanntesten, Radium, Aktinium, Polonium, Mesothorium und die Emanationen erwähnt.

Uran und Thorium erfahren auch innerhalb eines Zeitraumes von mehreren Jahren keine merkliche Abnahme ihrer Aktivität; sie bilden scheinbar unerschöpfliche, ohne äußere Energiezufuhr tätige Strahlungsquellen. In Wirklichkeit verlieren jedoch sowohl Uran und Thorium wie alle anderen radioaktiven Elemente ihr Strahlungsvermögen im Laufe der Zeit. Diese Abnahme erfolgt bei dem Uran und Thorium außerordentlich langsam; einige der oben erwähnten Zerfallsprodukte büßen jedoch ihre Aktivität schon innerhalb weniger Sekunden ein.

1d) Vorkommen radioaktiver Stoffe. Radioaktive Mineralien[1]) finden sich in eruptiven granitischen Gesteinen oder deren Umwandlungsprodukten. Während in den unveränderten Urgesteinen, Graniten, Syeniten, Pegmatiten, (Schweden-Norwegen, Ural, Nord-Dakota) die radioaktiven Stoffe

---

[1]) v. d. Borne, Jahrbuch der Radioaktivität 1906.

nur in sehr geringer Konzentration enthalten sind, finden sie sich in einigen Mineralien, die durch die Einwirkung von Wasser oder unter dem Einfluß der Atmosphärilien aus den Urgesteinen entstanden sind, zum Teil in bedeutendem Maße angereichert. So wird die Hauptquelle der Urangewinnung von den Pechblenden (Uraniniten U_3O_8) gebildet (Erzgebirge, Joachimsthal, Colorado, Cornwall), welche durch die Einwirkung von Wasser auf die Primärgesteine entstanden sind und 50 bis 80 % Uran neben 0 bis 10 % Thorium enthalten. Das wichtigste Ausgangsmaterial der Thoriumdarstellung stellt der Monazit dar (Phosphat seltener Erden, Brasilien, Carolina), der sich nach der Verwitterung der Muttergesteine in den Sanden angesammelt hat. Der Monazitsand enthält 7 bis 30 % Thorium und 0 bis 5 % Uran.

Das Vorkommen der radioaktiven Stoffe ist jedoch nicht auf die Mineralien beschränkt, vielmehr ist der ganze, unserer Beobachtung zugängliche Teil des Erdkörpers mehr oder weniger durchsetzt von radioaktiven Stoffen. Besondere Beachtung wegen ihrer Bedeutung für die Medizin hat die Radioaktivität der Thermalquellen und ihrer Sedimente gefunden. Auch die Luft enthält nicht unbedeutende Mengen radioaktiver Stoffe, die in dem Elektrizitätshaushalt der Atmosphäre eine wichtige Rolle spielen.

2. Meßmethoden. Zur Ausführung von radioaktiven Messungen hat man vornehmlich von den drei in der Einleitung erwähnten Haupteigenschaften der von den radioaktiven Stoffen ausgesandten Strahlen Gebrauch gemacht, der Entladung eines elektrisierten Körpers, der Einwirkung auf die photographische Platte und der Fluoreszenzerregung.

2a) Elektrische Meßmethoden. Damit ein elektrisch geladener Körper durch die Strahlen radioaktiver Stoffe entladen wird, ist es nicht notwendig, daß der Körper von den Strahlen selbst getroffen wird. Die Entladung ist vielmehr darauf zurückzuführen, daß die Strahlen die Eigenschaft besitzen, bei ihrem Durchgange durch ein Gas Elektrizitätsträger, positiv und negativ geladene Ionen, zu erzeugen, die unter dem Einflusse der elektrischen Anziehung zu dem geladenen Körper gelangen und ihre Ladung an ihn abgeben. Die Ionen, welche durch die von radioaktiven Stoffen ausgesandten Strahlen gebildet werden, haben sich als identisch erwiesen mit den durch Röntgenstrahlen erzeugten. Die Ionentheorie[1]), zu deren Aufstellung und Ausbau die elektrische Wirksamkeit der Röntgenstrahlen geführt hat, hat sich daher direkt auf die Untersuchung der von radioaktiven Stoffen ausgesandten Strahlen übertragen lassen.

Die Ladung eines Gasions ist, wie von Townsend aus Versuchen über die Diffusion der Ionen abgeleitet ist, in allen Gasen gleich und dieselbe, die an ein elektrolytisches Wasserstoffion gebunden ist. Ihr Wert ist zuerst von J. J. Thomson durch die Messung der Gesamtladung und der Zahl elektrisch geladener Wassertropfen bestimmt worden. Eine große Zahl anderer Methoden (R. Pohl, Jahrb. d. Rad. 1911), die sich auf Beobachtungen über die Brownsche Molekularbewegung, über radioaktive Prozesse und auf die Theorie der Wärmestrahlung stützen, haben in guter Uebereinstimmung den Mittelwert von $e = 4{,}65 \times 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten für die Ladung der Ionen, die „elektrische Elementarladung" ergeben.

Ein radioaktives Präparat C (Fig. 1), z. B. ein Salz von Uran oder Thorium, dessen Aktivität sich mit der Zeit nicht merklich ändere, durchdringe mit seinen Strahlen das Gas, welches sich zwischen den beiden, zunächst nicht geladenen, Kondensatorplatten A und B befindet. Da die Strahlung des Präparates konstant bleibt, wird in der Zeiteinheit von den Strahlen stets die gleiche Anzahl von positiven und negativen Ionen gebildet. Trotzdem wächst die Zahl der Ionen nicht unbegrenzt an, da

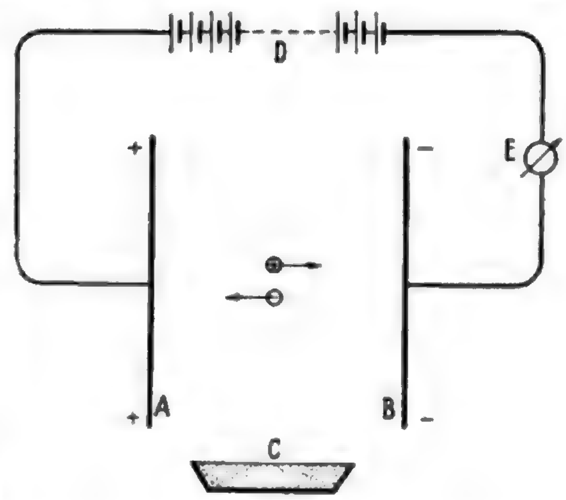


Fig. 1.

entgegengesetzt geladene Ionen unter dem Einfluß ihrer gegenseitigen Anziehung sich mit einander vereinigen und so in den elektrisch neutralen Zustand zurückkehren. Die Zahl der in der Zeiteinheit durch „Wiedervereinigung" verschwindenden Ionen nimmt mit der Gesamtzahl der vorhandenen Ionen schnell zu, es wird daher sehr schnell ein Zustand erreicht, in welchem gerade so viele

[1]) Siehe den Artikel „Elektrizitätsleitung in Gasen".

Ionen in der Zeiteinheit durch die Strahlen neu gebildet werden, wie durch die Wiedervereinigung verschwinden. Mit diesem Zustande erreicht die Gesamtzahl der in dem Gase vorhandenen Ionen offenbar ein Maximum.

Wird zwischen den beiden Platten ein elektrisches Feld hergestellt, indem etwa die Platte A mit dem positiven, die Platte B mit dem negativen Pole einer Batterie verbunden wird, so werden die positiven Ionen zur Platte B getrieben, während sich die negativen Ionen zu der Platte A bewegen. Es kommt also in dem Gase ein elektrischer Strom zustande, dessen Stärke mit Hilfe eines geeigneten in den Stromkreis eingeschalteten Meßinstrumentes E gemessen werden kann.

Die Beziehung, welche zwischen dem Strom und der zwischen den Elektroden herrschenden Spannung besteht, ist aus der Figur 2 zu ersehen. Die Stromstärke nimmt mit wachsender Spannung zunächst schnell, dann langsamer zu und nähert sich asymptotisch einem maximalen Werte, der als „Sättigungsstrom" bezeichnet wird. Die Ionentheorie erlaubt, die Form dieser Kurve in einfacher Weise zu erklären. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Gasionen in einem elektrischen Felde bewegen, ist, wie bei den elektrolytischen Ionen, der Stärke des elektrischen Feldes proportional. Bei kleinen Spannungen wandern die positiven und negativen Ionen also nur langsam aneinander vorbei und finden hierbei in großer

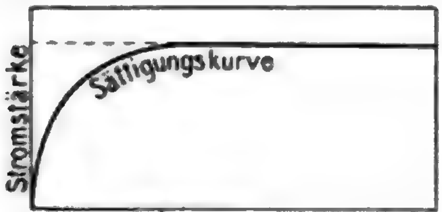


Fig. 2.

Zahl Zeit, sich miteinander zu vereinigen. Der durch das Meßinstrument E angezeigte Strom ist daher nur gering. Mit wachsender Spannung nimmt die Geschwindigkeit der Ionen immer mehr zu, die Zeit, die ihnen zur Wiedervereinigung bleibt, wird immer kleiner, bis schließlich praktisch alle Ionen ohne Verlust durch Wiedervereinigung zu den Elektroden gelangen. Eine weitere Steigerung der Stromstärke durch Erhöhung der Spannung ist dann offenbar nicht mehr möglich; der Sättigungsstrom ist daher ein Maß für die Ladung bezw. Anzahl der Ionen, die von den Strahlen innerhalb der Zeiteinheit erzeugt werden, und daher unter gleichbleibenden Bedingungen ein Maß für die Intensität der Strahlung.

Für die Messung starker Ionisationsströme kann man ein Galvanometer benutzen. Zur Untersuchung schwach aktiver Präparate, für welche die Empfindlichkeit des Galvanometers nicht ausreicht, dient das Elektroskop oder das Quadrantenelektrometer.

Eine einfache Form eines Blattelektroskopes ist von C. T. R. Wilson angegeben (vgl. Fig. 3). Ein Messinggefäß von etwa

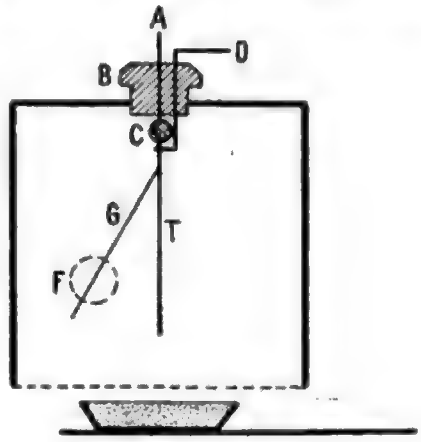


Fig. 3.

1 l Inhalt bildet die eine Elektrode des Kondensators, die andere wird durch den Metallstab T und das an ihm befestigte Gold- oder Aluminiumblatt G gebildet. Die beiden Elektroden sind voneinander durch den Hartgummi- oder Bernsteinstopfen B, welcher den Metallstab A trägt, und ferner durch das kurze, die beiden Metallstäbe A und T verbindende Bernsteinstück C isoliert. Das zu untersuchende radioaktive Präparat wird unter dem Elektroskop aufgestellt. Der Boden des Gehäuses wird durch eine fest aufschraubbare Metallplatte oder dünne Metallfolien verschlossen, so daß Strahlen von verschiedenem Durchdringungsvermögen untersucht werden können. In dem Gehäuse sind Fenster F aus Glas oder Glimmer angebracht, durch welche die Bewegung des Goldblattes mit Hilfe eines Mikroskopes mit Okularmikrometer beobachtet werden kann. Der bewegliche Draht D dient zur Aufladung des Goldblattsystems. Zur Ausführung eines Versuches wird das Elektroskop mit einem geriebenen Siegellackstückchen oder mit Hilfe einer Batterie auf 200 bis 300 Volt aufgeladen, und die Zeit bestimmt, welche das Goldblatt gebraucht, um einen bestimmten Teil der Skala zu passieren.

An dieser Bestimmung ist eine Korrektion für den natürlichen Ladungsverlust des Elektroskops anzubringen, der

vor oder nach der eigentlichen Beobachtung gemessen wird. Der natürliche Ladungsverlust rührt in Ausnahmefällen daher, daß die Bernsteinstücke B und C mangelhaft isolieren, in der Regel wird er durch eine schwache Aktivität des Gehäuses oder die von außen kommende durchdringende Strahlung des Erdbodens und der Luft verursacht. Die Kapazität des Goldblattsystems beträgt etwa eine elektrostatische Einheit. Das Elektroskop gestattet noch Ströme von 10^{-15} bis 10^{-16} Ampère genau zu messen.

Eine Modifikation des eben beschriebenen Apparates, bei welcher die Ionisationskammer von dem eigentlichen Elektroskopgefäß getrennt ist, stellt das von H. W. Schmidt konstruierte Elektroskop dar (Fig. 4). Die obere Oeffnung der Ionisationskammer kann entweder durch Metallfolien bezw. -platten verschlossen werden, oder, wie in der Figur gezeichnet, durch einen mit 2 Hähnen versehenen Deckel, der die Einführung radioaktiver Gase in die Ionisationskammer erlaubt.

Aus der großen Zahl anderer Elektroskopkonstruktionen sei hier noch das Fadenelektroskop von Wulf erwähnt, welches wegen seiner hohen Empfindlichkeit und vielseitigen Anwendbarkeit neuerdings vielfach gebraucht wird. Das Elektroskop besteht aus zwei feinen, mit einem Metallüberzug versehenen Quarzfäden F (Fig. 5). Diese sind an ihrem oberen Ende an dem durch Bernstein B isolierten Träger befestigt, durch den sie auch mittels L geladen werden. An ihrem unteren Ende werden sie durch

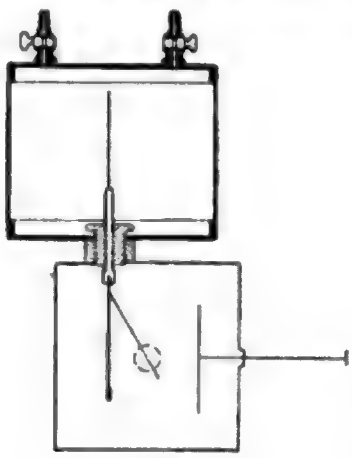


Fig. 4.

die elastische Quarzfeder Q gehalten. Beim Laden stoßen die beiden Fäden sich ab; ihr Abstand in der Fadenmitte kann durch ein Mikroskop mit Okularmikrometer abgelesen werden.

Eine bei radioaktiven Untersuchungen häufig gebrauchte Konstruktion des Quadrantenelektrometers ist von Dolezalek angegeben (Fig. 6). Eine spindelförmige, aus versilbertem Papier gefertigte Nadel N ist an einem dünnen Metallfaden (Wollaston-

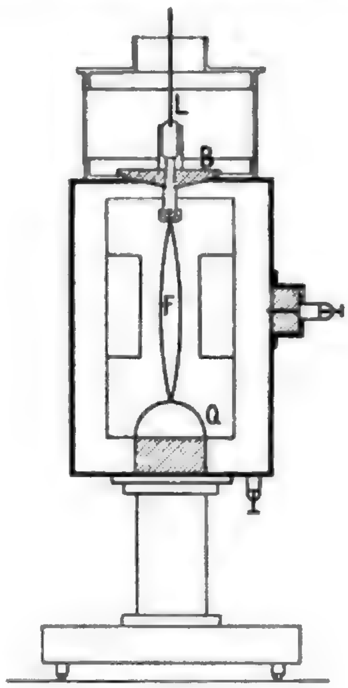


Fig. 5.

draht oder Phosphorbronzeband) in symmetrischer Lage zwischen den vier durch Bernstein isolierten Quadranten Q aufgehängt. Die Nadel wird auf konstantem Potential gehalten, indem sie z. B. mit dem positiven Pole einer Batterie von etwa 100 Volt verbunden wird, deren anderer Pol mit der Erde verbunden ist. Sind alle Quadranten geerdet, so erfolgt bei der Ladung der Nadel kein Ausschlag. Erteilt man dem Quadrantenpaare 1 (Fig. 7) eine negative Ladung, so wird die Nadel in das Quadrantenpaar 1 hineingezogen. Die Drehung der Nadel, die ein Maß für das dem Quadrantenpaare 1 erteilte Potential liefert, kann mit Hilfe des Spiegels A (Fig. 6) mit Fernrohr und Skala abgelesen werden. Die Empfindlichkeit läßt sich durch die Verwendung eines hinreichend dünnen Aufhängefadens auf etwa 10 m pro Volt steigern. Die Kapazität des Instrumentes beträgt etwa 50 elektrostatische Einheiten und bleibt bei der Drehung der Nadel nahezu konstant. Die Drehgeschwindigkeit der Nadel ist daher ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der das Potential des Quadrantenpaares 1 zunimmt, und also auch ein Maß für den Strom, welcher dem Quadrantenpaare 1 zufließt. Das Quadrantenelektrometer läßt sich daher zur Messung nicht nur von Potentialen, sondern auch von Stromstärken benutzen, und

hierfür wird es bei radioaktiven Arbeiten fast ausschließlich verwandt.

Eine häufig gebrauchte Anordnung zur Ausführung radioaktiver Messungen mit Hilfe des Quadrantenelektrometers ist in Figur 7 wiedergegeben. Das zu untersuchende radioaktive Präparat wird auf die mit der Batterie verbundene untere Elektrode A der Ionisationskammer gelegt. Die obere Elektrode B steht mit dem Quadrantenpaare 1 des Elektrometers in Verbindung, das Quadrantenpaar 2 ist geerdet. Vor Beginn der Messung leitet der Schlüssel S auch das Quadrantenpaar 1 und seine Verbindungen zur Erde ab. Eine bequeme Form des Schlüssels ist von G. Rümelin (Phys. Zeitschr. 1911) beschrieben worden. Wird die Erdung bei S unterbrochen, so steigt das Potential der Platte B und des Quadrantenpaares 1, und die Nadel beginnt sich zu drehen. Die Anzahl der in der Sekunde das Fadenkreuz des Fernrohres passierenden Skalenteile bildet ein Maß für die Stärke des Ionisationsstromes, der von der Elektrode A zu der Elektrode B fließt.

Während bei den bisher besprochenen Verwendungsarten von Elektroskop und Elektrometer die Aktivität aus der Winkelgeschwindigkeit bewegter Systeme bestimmt wird, erlaubt die von Bronson auf Anregung Rutherfords ausgearbeitete Methode der stetigen Ablenkung mit dem Elektrometer Stromstärken wie mit dem Galvanometer direkt abzulesen. Hierzu wird das Quadrantenpaar 1 durch einen, dem Ohmschen Gesetze gehorchenden Widerstand von etwa 10^{-11} Ohm zur Erde abgeleitet. Wird die Erdung des Quadrantenpaares 1 unterbrochen, so steigt sein Potential so lange an, bis die durch den Widerstand zur Erde fließende Elektrizitätsmenge gleich der durch den Ionisationsstrom nachgeliefertenist.



Fig. 6.

Die Ablenkung der Nadel ist proportional dem Ionisationsstrome und unabhängig von der Kapazität des Quadrantenpaares und seiner Verbindungen. Einen Widerstand von den gesuchten Eigenschaften stellt ein „Luftwiderstand" dar, ein Kondensator,

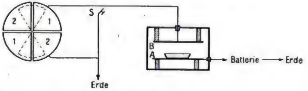


Fig. 7.

dessen eine Elektrode mit einer Schicht stark aktiver Materie bedeckt ist.

Als Nullinstrument dient das Quadrantenelektrometer bei einem von J. und P. Curie angegebenen Verfahren, welches die bei der Belastung eines piezoelektrischen Quarzes

freiwerdende Elektrizitätsmenge zur Kompensation des zu messenden elektrischen Stromes benutzt.

2b) Photographische und fluoroskopische Meßmethoden. Die photographische Platte ist bei radioaktiven Untersuchungen neben der früher erwähnten Verwendung zum Nachweis sehr schwacher Aktivitäten hauptsächlich benutzt worden, um Bilder von der Bahn der Strahlen zu erhalten. So sind nach der photographischen Methode fast alle Untersuchungen ausgeführt, welche das Verhalten der Strahlen im magnetischen und elektrischen Felde betreffen.

Von den Stoffen, welche durch die von radioaktiven Stoffen ausgesandten Strahlen zum Leuchten angeregt werden, seien hier das Bariumplatincyanür, die Mineralien Willemit und Kunzit, sowie die Sidotblende (kristallisiertes Zinksulfid) und der Diamant erwähnt. Die auf einem Leuchtschirm von den Strahlen hervorgerufene Fluoreszenz besteht im allgemeinen nicht aus einem gleichmäßigen Leuchten des Schirmes, sondern beruht, wie man unter dem Mikroskop erkennt, auf einem Aufblitzen diskreter Punkte (W. Crookes, Elster und Geitel 1903). Die Zählung dieser „Szintillationen" liefert ein Maß für die Aktivität der betreffenden radioaktiven Substanz. Sowohl die photographische wie die fluoroskopische Untersuchungsmethode ist nur einer beschränkten Anwendbarkeit fähig. Beide Methoden versagen vor allem, wenn es sich darum handelt, die Aktivität einer schnell sich ändernden radioaktiven Substanz zu verfolgen, während diese Aufgabe von der elektrischen Meßmethode leicht und exakt gelöst wird. Da die Messungen schnell sich ändernder Aktivitäten die Grundlage unserer Vorstellungen von den radioaktiven Prozessen geliefert haben, so ist die elektrische Meßmethode für den Fortschritt der radioaktiven Forschung von ausschlaggebender Bedeutung gewesen.

3. Eigenschaften der Strahlen. 3a) Arten der Strahlen, Durchdringungsvermögen. Die von einem Uran- oder Thoriumpräparat ausgesandte Strahlung besitzt keinen einheitlichen Charakter, es haben sich vielmehr in ihr drei Arten von Strahlen nachweisen lassen, die nach Rutherford als α-, β- und γ-Strahlen bezeichnet werden.

Alle drei Strahlenarten besitzen die Eigenschaft, ein Gas zu ionisieren und auf die photographische Platte einzuwirken; die Fähigkeit, Szintillationserscheinungen hervorzurufen, ist jedoch bisher nur bei den α-, und β-Strahlen nachgewiesen (Regener, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 1908). Zur Unterscheidung der drei Strahlenarten hat die Ungleichheit ihres Durchdringungsvermögens und ihr verschiedenartiges Verhalten im magnetischen und elektrischen Felde geführt.

Die α-Strahlen werden durch eine Aluminiumfolie von 0,05 mm Dicke völlig, die β-Strahlen durch eine Aluminiumschicht von 5 mm Dicke zum größten Teile absorbiert, zur Absorption der γ-Strahlen reicht jedoch eine 500 mm dicke Aluminiumplatte noch nicht aus. Diese Zahlen stellen rohe Mittelwerte dar, sie erlauben jedoch festzustellen, daß das Durchdringungsvermögen der drei Strahlenarten etwa in dem Verhältnis 1:100:10 000 steht.

3b) Verhalten der Strahlen im magnetischen und elektrischen Felde; Ladung der α- und β-Strahlen; Natur der Strahlungen. Wirkt ein starkes magnetisches Feld auf ein Bündel von α-,

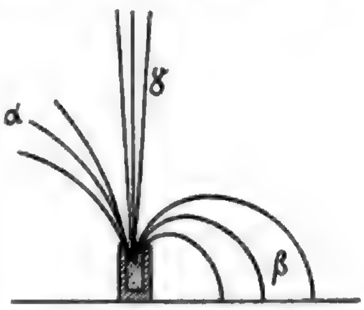


Fig. 8.

β- und γ-Strahlen senkrecht ein, so werden die drei Strahlenarten voneinander getrennt. Bei der schematischen Darstellung in Figur 8 ist angenommen, daß die magnetischen Kraftlinien die Zeichenebene von vorn nach hinten durchsetzen. Die Trennung der Strahlen läßt sich mit Hilfe der photographischen Platte oder eines Fluoreszenzschirmes nachweisen. Durch Bedeckung des strahlenden Präparates mit Aluminiumfolien läßt sich zeigen, daß die im Magnetfelde nicht abgelenkten Strahlen den durchdringenden γ-Strahlen entsprechen, die nach links abgelenkten Strahlen werden sehr leicht absorbiert, entsprechen also den α-Strahlen, während das nach rechts abgelenkte Strahlenbündel die Strahlen von mittlerem Durchdringungsvermögen, die β-Strahlen, repräsentiert.

Die Ablenkbarkeit der α- und β-Strahlen im magnetischen Felde beweist, daß diese Strahlen aus elektrisch geladenen Partikeln bestehen, die mit großer Geschwindigkeit von dem aktiven Stoffe ausgeschleudert werden. Die Ladung der α-Partikeln ist entgegengesetzt der der β-Partikeln; aus dem Sinne der Ablenkung und der Richtung des Magnetfeldes ergibt sich, daß die α-Partikeln positiv, die β-Partikeln negativ

geladen sind. Nach ihrem Verhalten im Magnetfelde gleichen also die α-Strahlen den Kanalstrahlen, die β-Strahlen den Kathodenstrahlen.

Die Ladung der α- und β-Strahlen läßt sich auch direkt nachweisen, wie für die α-Strahlen von Strutt, J. J. Thomson und Rutherford, für die β-Strahlen von P. und S. Curie, Strutt, W. Wien und Seitz gezeigt ist. Ein Faradayscher Käfig, der in einem evakuierten Gefäß aufgestellt ist, lädt sich positiv auf, wenn er nur von α-Strahlen getroffen wird, und negativ beim Eintritt von β-Strahlen. Um die α-Strahlen zu isolieren, läßt man senkrecht zu ihrer Eintrittsrichtung ein starkes magnetisches Feld wirken, welches die β-Strahlen ablenkt. Gleichzeitig werden durch das magnetische Feld die von den α-Strahlen beim Auftreffen auf die Wände des Faradayschen Gefäßes erzeugten Sekundärstrahlen, die aus negativ geladenen Teilchen von geringer Geschwindigkeit bestehen, gezwungen, kleine Kreise zu beschreiben und zu der Oberfläche, von der sie ausgingen, zurückzukehren.

Die Messung der Ablenkung der Strahlen im magnetischen und elektrischen Felde nach den Methoden, die zur Untersuchung der Kathoden- und Kanalstrahlen dienen, gestattet, die Geschwindigkeit der Partikeln und das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse, zu ermitteln. Nach diesen Messungen, deren Ergebnisse durch eine Reihe andersartiger, später zu erwähnender Versuche gestützt und ergänzt werden, besitzen alle α-Partikeln die gleiche Masse; sie bestehen aus Heliumatomen, deren Ladung das Doppelte der elektrischen Elementarladung beträgt. Die Geschwindigkeit der α-Partikeln nimmt bei ihrem Durchgange durch Materie ab. Alle von einem einheitlichen radioaktiven Stoffe, z. B. dem Polonium, ausgesandten α-Partikeln besitzen die gleiche Anfangsgeschwindigkeit. Die Anfangsgeschwindigkeiten der α-Partikeln sind bei verschiedenen radioaktiven Stoffen verschieden, sie liegen bei den bisher bekannten radioaktiven Stoffen zwischen den Werten $1,5 \times 10^9$ und $2,2 \times 10^9$ cm/sec, d. h. zwischen etwa $^1/_{20}$ und $^1/_{12}$ der Lichtgeschwindigkeit.

Die Masse der negativ geladenen β-Partikeln beträgt etwa 1:2000 der Masse des Wasserstoffatoms. Die größte Geschwindigkeit, mit der β-Partikeln von radioaktiven Stoffen ausgeschleudert werden, erreicht nahezu den Wert der Lichtgeschwindigkeit. Abgesehen von ihrer größeren Geschwindigkeit gleichen die β-Strahlen in jeder Beziehung den Kathodenstrahlen; sie bestehen wie diese aus schnell bewegten „Elektronen", d. h. Teilchen, deren Masse etwa den 2000. Teil der Masse des Wasserstoffatoms beträgt, und deren negative Ladung den Wert einer Elementarladung besitzt (vgl. den Artikel „Elektronen").

Im Gegensatz zu den α-Strahlen scheinen die von einem einheitlichen radioaktiven Stoffe ausgesandten β-Strahlen im allgemeinen nicht homogen zu sein, sondern sich aus Elektronen verschiedener Geschwindigkeit zusammenzusetzen. Als wertvolles analytisches Hilfsmittel ist von Hahn und Meitner die Beobachtung benutzt, daß die Absorption der von einem einheitlichen radioaktiven Stoffe ausgesandten β-Strahlen nach einem einfachen Exponentialgesetz erfolgt (Näheres siehe bei v. Bayer, Hahn und Meitner, Phys. Zeitschr. 1911).

Die γ-Strahlen gleichen in ihrem allgemeinen Charakter, besonders hinsichtlich ihres Verhaltens im magnetischen und elektrischen Felde den Röntgenstrahlen. Da γ-Strahlen nur bei denjenigen radioaktiven Stoffen auftreten, welche β-Strahlen emittieren, ist es wahrscheinlich, daß die Emission von γ-Strahlen in derselben Weise mit dem Auftreten von β-Strahlen verknüpft ist, wie die Emission von Röntgenstrahlen mit dem Auftreten von Kathodenstrahlen. Die γ-Strahlen sind daher nach der herrschenden Anschauung elektromagnetische Wellenimpulse, welche durch die Ausschleuderung der β-Partikeln verursacht werden, wie etwa bei dem Auftreffen eines Geschosses eine akustische Wellenbewegung, ein Knall, entsteht.

Bei dem Durchgange der γ-Strahlen durch die Materie nimmt ihre Intensität, wie die der β-Strahlen, nach einem Exponentialgesetz mit der Dicke der durchstrahlten Schicht ab.

Nach einer von Rutherford gegebenen Darstellung sind in Figur 9 die Massen und

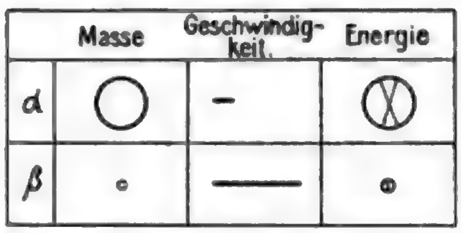


Fig. 9.

die Durchschnittswerte der Geschwindigkeit und der Energie der α- und β-Partikeln graphisch wiedergegeben. Trotz ihrer höheren Geschwindigkeit besitzt die β-Partikel wegen ihrer kleineren Masse eine sehr viel geringere Energie als die α-Partikel. Diesem Umstande entspricht die Beobachtung, daß die ionisierende und szintillationserregende usw. Wirksamkeit der α-Strahlen erheblich größer ist als die der β-Strahlen.

3c) **Absorption der α-Strahlen in Gasen, Reichweite.** Beim Durchgange der α-Partikeln durch Materie erfährt nur ihre Geschwindigkeit eine Verringerung, während ihre Zahl und Richtung nicht merklich geändert wird. Die Bahn der α-Partikel beschränkt sich in Luft von Atmosphärendruck auf wenige Zentimeter. Nachdem die α-Partikeln diese Bahn durchlaufen haben, erlischt ihr Ionisationsvermögen, sowie ihre Fähigkeit, auf die photographische Platte oder einen Fluoreszenzschirm zu wirken und ein Faradaysches Gefäß aufzuladen. Der Abstand zwischen diesem Ende der Bahn der α-Partikeln und ihrer Quelle wird als Reichweite der α-Partikeln bezeichnet.

Das Ionisierungsvermögen der α-Strahlen an verschiedenen Punkten ihrer Bahn ist zuerst von Bragg und Kleeman untersucht worden. Die von ihnen angegebene Versuchsanordnung ist in Figur 10 skizziert.

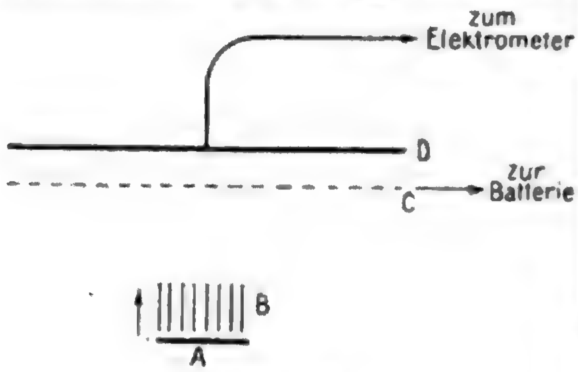


Fig. 10.

Die Strahlen, welche von einer dünnen Schicht eines einheitlichen radioaktiven Stoffes A, z. B. einer Poloniumschicht, ausgehen, passieren zunächst einen Satz enger Röhrchen B, so daß die aus diesem Diaphragmensystem austretenden Strahlen nahezu parallel sind. Die von den Strahlen erzeugte Ionisation wird in der Ionisationskammer CD gemessen, welche aus dem mit der Batterie verbundenen Drahtnetz C und der zum Elektrometer führenden Platte D besteht. Durch Variierung des Abstandes zwischen dem aktiven Präparate und der Ionisationskammer läßt sich die von den Strahlen in verschiedenen Abständen von der Strahlungsquelle erzeugte Ionisation bestimmen.

Die in Figur 11 dargestellte Kurve I gibt die Resultate wieder, die nach diesem Verfahren von Levin mit einem unbedeckten Poloniumpräparat erhalten wurden; bei den durch die Kurve II dargestellten Versuchen war das Präparat mit einer Aluminiumfolie von etwa 0,0003 cm Dicke bedeckt. Bei beiden Kurven nimmt die Ionisation mit wachsender Entfernung der Ionisationskammer von der Strahlenquelle zu, um nach Erreichung eines Maximums schnell auf den konstanten Wert zu sinken, welcher der natürlichen Ionisation entspricht. Der Abstand, bei dem die Ionisation durch die α-Strahlen nicht mehr merklich ist, gibt die Reichweite der α-Strahlen an. Durch die Zwischenschaltung des Aluminiums wird die Reichweite verringert, der Betrag der Maximalionisation jedoch nicht geändert. Hieraus geht hervor, daß durch die Einschaltung der Aluminiumschicht nur die Geschwindigkeit, nicht aber die Zahl der α-Partikeln eine Aenderung erfährt.

Bei allen einheitlichen radioaktiven Stoffen besitzen die Ionisationskurven die charakteristische Form der Kurven der Figur 11;

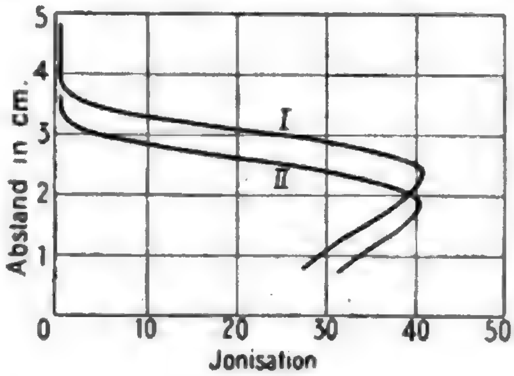


Fig. 11.

ein Unterschied besteht nur in der Reichweite, die einen für jeden Stoff charakteristischen Wert besitzt.

Die Geschwindigkeiten der α-Partikeln an verschiedenen Stellen ihrer Bahn sind in der Figur 12 nach den Versuchen von Rutherford und Geiger für die α-Strahlen des Ra-C (s. Abschnitt 5d) in willkürlichen Einheiten wiedergegeben. Die α-Partikeln von Ra-C besitzen eine Reichweite von 7 cm; die Figur läßt erkennen, daß ihre Ge-

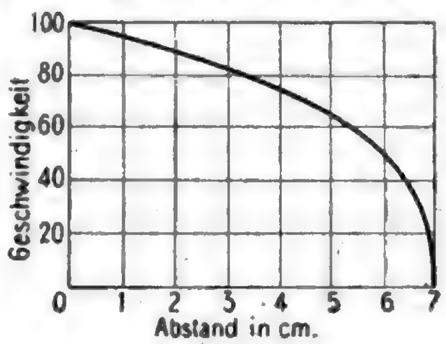


Fig. 12.

schwindigkeit gegen das Ende der Bahn sehr schnell abnimmt. Geiger hat daher angenommen, daß die Geschwindigkeit der α-Partikeln am Ende ihrer Reichweite vergleichbar mit der der Gasmoleküle wird, und die α-Partikeln sich weiterhin wie gewöhnliche Gasionen verhalten.

Die Beziehung zwischen der Reichweite R und der Geschwindigkeit v der α-Partikeln läßt sich durch eine Gleichung von der Form $v^3 = a(R - x)$ darstellen, wenn x den Abstand von der Strahlenquelle und a eine Konstante bezeichnet. Hieraus läßt sich die Ionisation, die an jeder Stelle der Bahn herrscht, unter der naheliegenden Annahme berechnen, daß die von einer α-Partikel längs eines Wegelementes erzeugte Ionisation proportional dem Verlust der α-Partikel an kinetischer Energie ist. Unter dieser Voraussetzung ergibt sich für die Ionisation J die Gleichung:

$$J = \frac{b}{(R - x)^{\frac{1}{3}}},$$

wenn b eine Konstante ist. Diese Gleichung liefert eine befriedigende Uebereinstimmung mit der experimentell erhaltenen Ionisationskurve, wenn berücksichtigt wird, daß die α-Strahlen auf ihrem Wege eine geringe Zerstreuung erfahren. Eine eingehende Uebersicht über die Eigenschaften der α-Strahlen ist von Geiger (Phys. Zeitschr. 1910) gegeben worden.

3d) Sekundärstrahlen. Rückstoßwirkung. Beim Auftreffen auf Materie erzeugen alle drei Strahlenarten Sekundärstrahlen.

Von einem durch β- und γ-Strahlen getroffenen Körper gehen wieder β- und γ-Strahlen aus, welche tertiäre Strahlen usw. bilden können.

Die bei den Versuchen über die Ladung der Strahlen bereits erwähnten Sekundärstrahlen der α-Strahlen werden nach J. J. Thomson als δ-Strahlen bezeichnet. Sie bestehen wie die β-Strahlen aus negativ geladenen Elektronen, ihre Geschwindigkeit beträgt jedoch nur einen geringen Bruchteil der Geschwindigkeit der letzteren (Ewers, 1906).

Werden von einem radioaktiven Stoff α- oder β-Strahlen ausgesandt, so sollte der nach Emission der Strahlen verbleibende Rest negativ geladen sein, wenn nur α-Strahlen ausgesandt werden, und positiv, wenn nur β-Strahlen das Präparat verlassen. In Wirklichkeit besitzen jedoch die nach Aussendung der Strahlen verbleibenden Restteilchen stets eine positive Ladung. Diese Erscheinung ist auf die Wirkung der zugleich mit den α-Partikeln auftretenden negativ geladenen δ-Partikeln zurückzuführen.

Die Ladung der Restteilchen erlaubt es, diese mit Hilfe eines elektrischen Feldes zu konzentrieren. Von Rutherford (Phil. Mag. 1900) ist die Beobachtung gemacht, daß die aus gasförmigen radioaktiven Stoffen entstehenden Restteilchen, die sogenannten aktiven Niederschläge (vgl. Abschnitt 5c), sich auf der negativen Elektrode eines in dem Gase erzeugten elektrischen Feldes ansammeln lassen. Die von einem festen radioaktiven Stoffe gebildeten Restteilchen sind von Hahn (Phys. Zeitschr. 1909) in ähnlicher Weise nachgewiesen worden, indem eine negativ geladene Metallplatte dem Präparate in möglichst geringer Entfernung gegenüber gestellt wurde.

Wird von einem Teilchen eines aktiven Stoffes eine α-Partikel ausgesandt, so müssen die Impulse, welche die α-Partikel und der Rest des Teilchens in entgegengesetzter Richtung erfahren, einander gleich sein. Es muß also das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit für die ausgesandten α-Partikeln, d. h. Heliumatome, dasselbe sein wie für die Restteilchen. Machen wir die Annahme, deren Begründung wir später (Abschnitt 4b) kennen lernen werden, daß die Restteilchen aus den nach der Fortschleuderung einer α-Partikel verbleibenden Restatomen des radioaktiven Stoffes bestehen, so ist das Verhältnis der Masse der α-Partikel zu der des Restatoms mindestens gleich $^4/_{240}$, da das höchste bekannte Atomgewicht, das des Urans, 238,5 beträgt und das des Heliums gleich vier ist. Da die Anfangsgeschwindigkeit der α-Partikel (vgl. Abschnitt 3b) größer ist als $1{,}5 \times 10^9$ cm/sec, so berechnet sich für die Anfangsgeschwindigkeit des Restatoms ein Wert von mindestens 10^7 cm/sec. Nur etwa den 100. Teil dieses Wertes beträgt die Rückstoßgeschwindigkeit, welche dem Restatom bei der Ausschleuderung einer β-Partikel erteilt wird.

Wenn diese Geschwindigkeiten der durch Rückstoß fortgeschleuderten Restteilchen im Vergleich mit den Geschwindigkeiten der α- und β-Partikeln zwar gering erscheinen, so sind sie doch sehr groß im Vergleich mit der durchschnittlichen Geschwindigkeit eines gewöhnlichen Gasmoleküls. Sie befähigen die Restteilchen eines festen radioaktiven Stoffes, das Ausgangsmaterial zu verlassen und in die umgebende Luft einzutreten. Die „Rückstoßatome" vermögen dünne Metallschichten zu durchdringen und neutrale Gasmoleküle zu ionisieren. Nach den Versuchen von Makower (Phil. Mag. 1910) über die Ablenkung der Rückstoßteilchen im elektrischen und magnetischen Felde, stehen ihre Geschwindigkeit und das Verhältnis zwischen ihrer Ladung und ihrer Masse im Einklang mit der oben gemachten Annahme über die Natur der Restteilchen.

3e) Chemische Wirkungen der Strahlen. Die von stark aktiven Präparaten ausgesandten Strahlen vermögen chemische Reaktionen hervorzurufen, z. B. die Zersetzung von Wasser, Kohlensäure, Kohlenoxyd, Ammoniak und Salzsäure herbeizuführen. In der Regel treten unter dem

Einflusse der Strahlen auch die umgekehrten Reaktionen ein.

Ein während längerer Zeit verschlossen gehaltenes stark aktives Präparat läßt beim Oeffnen des Gefäßes einen starken Ozongeruch bemerken. Mit der Bildung des Ozons hängen möglicherweise die Oxydationswirkungen zusammen, welche stark aktive Präparate auf Metalle, wie Kupfer und Quecksilber, und auf organische Substanzen ausüben. Die erwähnten chemischen Prozesse beruhen hauptsächlich auf der Wirkung der α-Strahlen und in geringerem Grade auf der der durchdringenderen Strahlen.

Unter dem Einfluß der Strahlen nimmt Glas eine intensiv braune oder violette Färbung an. Die von α-Strahlen im Glase erzeugte farbige Zone ist scharf begrenzt; ihr Radius entspricht der Reichweite der α-Strahlen in dem Glase. Dem Steinsalz und einer Reihe anderer Mineralien werden unter dem Einflusse der Strahlen charakteristische Färbungen erteilt (vgl. C. Doelter, Das Radium und die Farben, Dresden 1910). Bei manchen Mineralien, wie Biotit, Cordierit, Muskovit, sind seit langem eigentümliche, scharf begrenzte, farbige Zonen bekannt, welche eingeschlossene Kristalle von Zirkon oder Apatit umgeben. Die Entstehung dieser, „pleochroitische Halos" genannten Farbenkreise ist von Joly und Mügge auf die Wirkung der α-Strahlen der in den eingeschlossenen Kristallen enthaltenen radioaktiven Stoffe zurückgeführt. Die Halos bestehen in der Regel aus mehreren, verschieden gefärbten, konzentrischen Zonen, deren Radien den Reichweiten verschiedener Gruppen von α-Strahlen entsprechen.

Versuche, durch die Einwirkung stark radioaktiver Stoffe Elemente ineinander umzuwandeln, sind von Ramsay unter der Mitarbeit von Cameron und Gray ausgeführt worden. Die mitgeteilten Beobachtungen, z. B. die Bildung von Neon aus Wasser, von Lithium aus Kupfer und von Kohlensäure aus Thorium und Zirkon, haben sich jedoch bisher nicht bestätigen lassen.

Auf die physiologischen Wirkungen der Strahlen und die Verwendung radioaktiver Stoffe zu medizinischen Zwecken einzugehen, ist hier nicht der Ort (vgl. Bd. I, S. 987).

4. Radioaktive Umwandlungen des Urans. Theorie des Atomzerfalles. 4a) Chemische Darstellung eines neuen radioaktiven Stoffes aus Uransalzen. Nach den bereits erwähnten Versuchen von Becquerel und Mme. Curie hängt die Aktivität einer Uranverbindung wesentlich von ihrem Urangehalt ab. Der hieraus gezogene Schluß, daß die Fähigkeit, Strahlen auszusenden, eine spezifische Eigenschaft des Elementes Uran darstellt, ist durch die weiteren Ergebnisse der Forschung bestätigt worden. In der Natur kommen jedoch Uranverbindungen (Pechblenden, Chalkolith und Autunit) vor, deren spezifische Aktivität (Aktivität pro gr) die spezifische Aktivität von gleichen präparativ dargestellten Uranverbindungen um das 4- bis 5-fache übertrifft. Ferner ist es möglich, auf chemischem Wege Uransalzen, ohne daß ihr Urangehalt eine Aenderung erfährt, einen Teil ihrer Aktivität zu entziehen.

Indem Mme. Curie der ersteren von ihr gemachten Beobachtung nachging, konnte sie zeigen, daß die erwähnten Uranmineralien Spuren einer neuen Substanz enthalten, deren Aktivität so groß ist, daß ihre Wirkung die des in viel größerer Menge in den Mineralien vorhandenen Urans bei weitem übertrifft. Die eingehende chemische Untersuchung der stark aktiven Beimengung hat zur Entdeckung des Radiums und des Poloniums geführt. Auf diese neuen radioaktiven Stoffe wird weiter unten eingegangen werden. Im folgenden wenden wir uns zunächst zu den Versuchen, die Aktivität präparativ dargestellter Uranverbindungen auf chemischem Wege zu beeinflussen.

Versetzt man die wässerige Lösung eines reinen Uransalzes mit Ammoniumkarbonat und löst den entstehenden Niederschlag in einem Ueberschusse des Fällungsmittels wieder auf, so bleibt eine kaum sichtbare Menge eines uranfreien Rückstandes ungelöst, die sich durch Filtration von der Lösung trennen läßt. Untersucht man die β- und γ-Strahlenaktivität sowohl des Rückstandes wie der zur Trockene eingedampften Lösung, so zeigt sich, daß das Uran seine β- und γ-Strahlenaktivität praktisch vollständig verloren und an den Rückstand abgegeben hat. Zur Ausführung dieser Versuche kann man sich des in Figur 3 dargestellten Elektroskopes bedienen, dessen Boden man mit einer zur Absorption der α-Strahlen ausreichenden Aluminiumplatte von etwa 0,1 mm Dicke verschließt.

Das Verhältnis zwischen der β- und γ-Strahlenaktivität des Rückstandes und des eingedampften Filtrates bleibt jedoch nicht unverändert bestehen. Im Laufe der Zeit verliert der Rückstand seine Aktivität, während das Uran seine Aktivität vollständig zurückgewinnt. Wird das Uransalz, nachdem es seine Aktivität wiedergewonnen hat, von neuem aufgelöst, und mit Ammoniumkarbonat behandelt, so erhält man einen Rückstand von der gleichen Aktivität wie bei dem ersten Versuche. Dieses Verfahren kann beliebig oft wiederholt werden.

Die zeitlichen Veränderungen der Aktivitäten sind in Figur 13 graphisch dargestellt. In der Figur bezeichnen die Abszissen die Zeit in Tagen, die Ordinaten die durch Messung der Ionisationsströme er-

mittelten Aktivitäten. Die Anfangsaktivität des Rückstandes, Kurve I Abfall der Aktivität, und die Endaktivität des Urans, Kurve II Erholung der Aktivität, sind gleich 100 gesetzt. Wie man sieht, nimmt die Aktivität des Rückstandes nach einem einfachen Gesetze ab, sie sinkt in etwa 25 Tagen auf die Hälfte, in der doppelten Zeit, 50 Tagen, auf ein Viertel, in 75 Tagen auf ein Achtel usw. ihres Anfangswertes. Die Abnahme der Aktivität des Rückstandes erfolgt also nach einem Exponentialgesetz. Bedeutet J_0 die Anfangsaktivität, λ eine Konstante und e die Basis der natürlichen Logarithmen, so wird die Aktivität J zu einer Zeit t gegeben durch die Gleichung:

$$(1.) \qquad \frac{J}{J_0} = e^{-\lambda t}.$$

Trägt man in ein Koordinatensystem die Logarithmen der Aktivität des Rückstandes als Ordinaten, die Zeiten als Abszissen ein, so fallen alle Punkte in eine Gerade. Der genaue Wert der Zeit, in der die Aktivität des Rückstandes auf die Hälfte ihres Wertes sinkt, die Halbwertszeit, beträgt nach Versuchen Soddys und Russells (Phil. Mag. 1910) T = 24,6 Tage. Hieraus berechnet sich nach Gleichung (1) die Konstante λ zu

$$(3.) \qquad \lambda = \frac{\ln 2}{T};$$

$$\lambda = \frac{0{,}693}{24{,}6 \times 24 \times 3600} = 3{,}26 \times 10^{-7} (\mathrm{sec})^{-1}.$$

Die für die Abnahme bezw. Zunahme der Aktivität charakteristische Konstante λ wird als radioaktive Konstante bezeichnet;

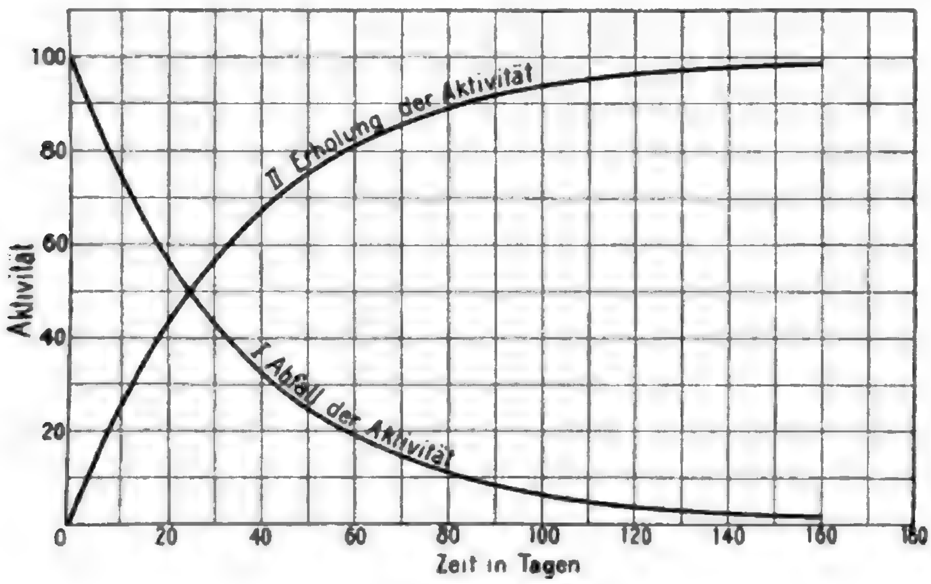


Fig. 13.

In der gleichen Zeit, in der die Aktivität des Rückstandes auf die Hälfte ihres Anfangswertes sinkt, gewinnt das Uran die Hälfte der Aktivität zurück, die es nach sehr langer Zeit erlangt. Nach 50 Tagen beträgt seine Aktivität $\frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$ des Endwertes usw. Die Kurve der Aktivitätszunahme des Urans läßt sich daher durch die Gleichung darstellen:

$$(2.) \qquad \frac{J}{J_\infty} = 1 - e^{-\lambda t},$$

wenn J die Aktivität bezeichnet, welche das Uran nach Ablauf der Zeit t, gerechnet von der Zeit der chemischen Abtrennung des Rückstandes, besitzt, und wenn J_∞ den Maximalwert darstellt, den die Aktivität des Urans nach sehr langer Zeit erreicht. Die Konstante λ hat in dieser Gleichung denselben Wert wie in Gleichung (1).

ihre Dimension ist die einer reziproken Zeit. Soviel wir bisher wissen, ist der Wert dieser Konstanten, d. h. die Geschwindigkeit der Zu- und Abnahme der Aktivität, völlig unabhängig von den physikalischen Bedingungen der Temperatur, des Druckes usw., unter denen sich die strahlende Substanz befindet.

Ehe wir auf eine Erklärung dieser Erscheinungen eingehen, seien noch einige Beobachtungen über das Verhalten der α-Strahlenaktivität mitgeteilt. Untersucht man die von einem Uransalz ausgehende gesamte Strahlung mit Hilfe einer Versuchsanordnung nach Art der Figur 3, so findet man, daß bei der Bedeckung des Präparates mit einer etwa 0,1 mm dicken Aluminiumschicht der Ionisationsstrom um mehr als 90 % sinkt. Es rühren also mehr als 90 % der durch die Gesamtstrahlung

bewirkten Ionisation von den leicht absorbierbaren α-Strahlen her. Während durch die Behandlung mit Ammoniumkarbonat das Uransalz seine β- und γ-Strahlenaktivität fast völlig verliert, wird seine α-Strahlenaktivität nicht in merklichem Maße geändert. Der durch seine starke β- und γ-Strahlenaktivität ausgezeichnete Rückstand sendet dagegen α-Strahlen nicht in merklicher Menge aus. Durch den chemischen Prozeß geht also nur die β- und γ-Strahlenaktivität des Urans an den Rückstand über, während die α-Strahlenaktivität ungeändert bleibt.

Zurzeit ist eine ganze Reihe von Prozessen bekannt, welche erlauben, dem Uran seine durchdringende Strahlung vollständig oder nahezu vollständig zu rauben und sie in verschwindend geringen Substanzmengen anzureichern. Alle Versuche, die α-Strahlenaktivität des Urans zu beeinflussen, sind dagegen bisher erfolglos gewesen. Die oben abgeleitete Folgerung, daß die von einem Uranpräparat ausgesandten Strahlen von dem Elemente Uran ausgehen, ist also dahin zu modifizieren, daß lediglich die Fähigkeit, α-Strahlen auszusenden, eine atomistische Eigenschaft des Urans ist. Die Versuche, aus den Rückständen einen neuen Stoff chemisch rein darzustellen, dem die hohe spezifische Aktivität des Rückstandes zugeschrieben werden könnte, sind bisher nicht von Erfolg begleitet gewesen.

4b) Zerfallstheorie, Umwandlung des Urans in Uran-X. Von einer Deutung der beschriebenen Beobachtungen wird man vor allem über zwei Punkte Aufklärung verlangen. Nach erfolgter chemischer Trennung stellen das Uransalz und der Rückstand zwei chemische Präparate dar, von denen man unbefangenerweise annehmen würde, daß sie ebensowenig weiterhin miteinander in Zusammenhang stehen würden, wie Filtrat und Niederschlag irgendeiner anderen chemischen Reaktion. Trotzdem scheint eine sehr enge Beziehung zwischen den beiden Präparaten fortzubestehen, indem das eine seine Aktivität genau nach demselben Gesetz verliert, wie das andere sie wiedergewinnt. Weiterhin bedarf die auffallende Beobachtung, daß die Geschwindigkeit der Zu- und Abnahme der Aktivität ganz unabhängig von den physikalischen Bedingungen ist, einer Erklärung. Auf beide Fragen gibt die von Rutherford und Soddy (Phil. Mag. (6) 4, S. 370 und 569, 1902) aufgestellte Zerfalls- oder Umwandlungstheorie Antwort.

Da sowohl die α- wie die β-Strahlen materieller Natur sind, so muß, falls das Gesetz von der Erhaltung der Masse auch für die Strahlung gilt, die Masse eines Präparates, um die Masse eines Heliumatoms abnehmen, wenn eine α-Partikel das Präparat verläßt, und um die Masse eines Elektrons, wenn eine β-Partikel ausgesandt wird. Die Quelle, aus der die α-Partikeln stammen, ist nach den oben mitgeteilten Beobachtungen in den Atomen des Urans zu suchen. Wir gelangen also zu der Vorstellung, daß das Uranatom spontan zerfällt in: ein positiv geladenes Heliumatom und, im einfachsten Falle, ein Restatom, dessen Atomgewicht um vier Einheiten kleiner ist, als das Atomgewicht des Urans, also 234,4 Einheiten beträgt (Atomgewicht des Urans = 238,4, Atomgewicht des Heliums = 4 Einheiten).

Das Restatom wird sich in chemischer und physikalischer Beziehung von dem Mutteratom unterscheiden. Nach der Grundvoraussetzung der Atomtheorie sind die Atome Einheiten, die jeglichem Angriff durch die uns zur Verfügung stehenden physikalischen und chemischen Hilfsmittel widerstehen. Indem wir diese Annahme für das Uran beibehalten, und das Auftreten der Strahlung auf einen Vorgang innerhalb des unserer Beeinflussung unzugänglichen Atoms zurückführen, gewinnen wir eine Erklärung dafür, warum die Strahlung spontan auftritt und durch äußere Wirkung nicht beeinflußt werden kann. Zugleich findet auch die große Energie der Strahlen eine Erklärung, wenn ihre Quelle das Atom bildet, das wir als den Sitz außerordentlicher Kräfte ansehen. In analoger Weise werden wir den Ursprung der β- und γ-Strahlen in den Atomen eines neuen Stoffes, des Uran-X, suchen, der gewöhnlich mit dem Uran vergesellschaftet ist, aber auf chemischem Wege, z. B. durch die Behandlung mit Ammoniumkarbonat, von ihm getrennt werden kann. Bei der Aussendung einer β-Partikel geht auch das Atom des Uran-X in ein neues Atom von anderen Eigenschaften über.

Wir haben nun mit den beobachteten Ionisationseffekten die angenommenen Zerfallsprozesse in Verbindung zu setzen, d. h. aus unserer Annahme des Atomzerfalles von Uran und Uran-X das Gesetz abzuleiten, nach dem die β- und γ-Strahlenaktivität des Uran-X abnimmt und die des Urans regeneriert wird.

Wenn bei dem Zerfall von Uran-X jedes Atom eine β-Partikel von gleichem Ionisationsvermögen aussendet, so ist die von einem Uran-X-Präparat hervorgebrachte Ionisation proportional der Anzahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Atome von Uran-X. Die Messung des Sättigungsstromes liefert also ein Maß für die Zerfallsgeschwindigkeit des Uran-X. Wenn n die Zahl der zur Zeit t in der Zeiteinheit zerfallenden Atome, J den Sättigungsstrom zur Zeit t und k eine Konstante bedeutet, so ist also: $J = k\,n$. Mit Hilfe der entsprechenden

Gleichung für die Zeit t = 0, und der Gleichung (1) ergibt sich:

$$\frac{n}{n_0} = \frac{J}{J_0} = e^{-\lambda t}$$

d. h. die Anzahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Atome nimmt nach demselben Gesetz ab, wie die Aktivität.

Die Gesamtzahl N aller nach der Zeit t zerfallenden Atome erhält man offenbar durch Summierung aller in dem Zeitraum von t bis t = ∞ zerfallenden Atome, daher ist:

$$N = \int_t^\infty n dt = \frac{n_0}{\lambda} e^{-\lambda t}.$$

Hieraus ergibt sich für die Gesamtzahl N_0 der nach der Zeit o zerfallenden Atome:

$$N_0 = \frac{n_0}{\lambda}.$$

Daher ist:

(4) $$N = N_0 . e^{-\lambda t}; \text{ ferner:}$$

(5) $$-\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 . e^{-\lambda t} = \lambda N$$

und:

(6) $$J = k . \lambda . N.$$

Wir gewinnen daher die folgenden Sätze: Die Anzahl der noch nicht zerfallenen Atome des Uran-X nimmt nach demselben Gesetz ab wie die Aktivität; die Aktivität ist der Anzahl der vorhandenen Atome des Uran-X direkt proportional.

Das Zerfallsgesetz, Gleichungen (4) und (5), ist dasselbe wie das der unimolekularen chemischen Reaktionen. Für λ ergibt sich nach Gleichung (5) der Wert:

$$\lambda = \frac{-1}{N}\frac{dN}{dt};$$

die radioaktive Konstante gibt also den Prozentsatz der in der Zeiteinheit zerfallenden Atome an.

Nach der Zerfallstheorie gelten die eben besprochenen Sätze für jeden radioaktiven Stoff. Es unterliegt hiernach jeder radioaktive Stoff einem spontanen Zerfall, der nach einem einfachen Exponentialgesetz mit einer für den betreffenden Stoff charakteristischen Konstanten erfolgt (Gleichung 4). Die Aktivität ist der Menge des vorhandenen Stoffes proportional (Gleichung 6), wobei die Konstante k für verschiedene Stoffe verschieden sein kann.

Um die Abnahme der Aktivität des Uran-X mit der Zunahme der β- und γ-Strahlenaktivität des Urans zu verknüpfen, machen wir die Annahme, daß das Uran-X das Restatom sei, welches bei der Aussendung einer α-Partikel aus dem Uranatom entsteht.

Die Zahl der in einem Uranpräparat in der Zeiteinheit zerfallenden Uranatome ist nach Gleichung (5) $-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1$, wenn N_1 die zur Zeit t vorhandenen Uranatome und λ_1 die radioaktive Konstante des Urans bedeuten.

War das Präparat ursprünglich völlig von Uran-X befreit, so sammelt sich allmählich in ihm wieder Uran-X an, indem in der Zeiteinheit $\lambda_1 N_1$ Atome Uran-X durch den Zerfall des Urans neu entstehen. Die Menge des Uran-X kann jedoch nicht beliebig wachsen, da durch den spontanen Zerfall des Uran-X wieder Uran-X verschwindet. Zu einer Zeit t nach der Abtrennung des Uran-X sei N_2 die Anzahl der vorhandenen Uran-X-Atome. Die Zunahme $\frac{dN_2}{dt}$, welche diese Zahl in der Zeiteinheit erfährt, ist offenbar gleich der Differenz aus der Anzahl $\lambda_1 N_1$, der in der Zeiteinheit durch den Uranzerfall neu entstehenden und der Anzahl $\lambda_2 N_2$ der durch den Zerfall des Uran-X verschwindenden Atome.

Es ist also:

(7) $$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

Aus der Beobachtung, daß die α-Strahlenaktivität des Urans sich mit der Zeit nicht merklich ändert, folgt nach den Gleichungen (5) und (6), daß auch die Zerfallsgeschwindigkeit konstant ist. Wir können daher in der Gleichung (7) $\lambda_1 N_1 = n_0$ setzen, wenn n_0 eine Konstante bedeutet.

Die Integration liefert dann, da für t = 0, $N_2 = 0$ ist, das Resultat:

$$N_2 = \frac{n_0}{\lambda_2}(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

Mit wachsendem t nimmt N_2 zu und nähert sich dem Werte $\frac{n_0}{\lambda}$. Bezeichnen wir diesen Wert mit N_∞, so lautet unsere Gleichung:

(8) $$\frac{N_2}{N_\infty} = 1 - e^{-\lambda_2 t}.$$

Die Anzahl der Uran-X-Atome nimmt also nach demselben Gesetz (Gleichung 2) zu, wie die β- und γ-Strahlenaktivität des Uranpräparates. Wir sehen also, daß die Abfalls- und Erholungskurven des Uran-X vollständig durch die beiden einfachen Annahmen erklärt werden, daß:

1. das Uran-X ununterbrochen nach dem Gesetz der unimolekularen Reaktionen zerfällt,

2. daß eine konstante Produktion des Uran-X durch das Uran stattfindet.

Eine graphische Darstellung der Umwandlungsreihe des Urans, soweit sie bisher besprochen wurde, ist in dem Diagramm der Figur 14 wiedergegeben. Die Ableitung des

für die Halbwertszeit des Urans angegebenen Wertes von ca. 10^9 Jahren findet sich im Abschnitt 9c; das Zerfallsprodukt des Uran-X wird im Abschnitt 9b besprochen werden.

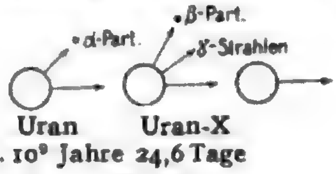


Fig. 14.

Die Aktivität der Radioelemente geht nach unserem bisherigen Wissen stets Hand in Hand mit der Erzeugung neuer Stoffe von bestimmten physikalischen und chemischen Eigenschaften. In dem Beispiel des Uranzerfalls ist die Deutung der Aktivitätskurven besonders einfach. Wir haben hier zur Erklärung der experimentellen Beobachtungen nur zwei Umwandlungen heranzuziehen, die sich durch die Art der bei ihnen ausgesandten Strahlen leicht voneinander unterscheiden lassen. Die Aktivität des ersten Gliedes der Umwandlungsreihe, des Urans, kann als konstant betrachtet und die Aktivität des aus dem Uran-X entstehenden Stoffes vernachlässigt werden. Es entstehen jedoch keine neuen grundsätzlichen Schwierigkeiten, wenn es sich darum handelt, die Zerfallstheorie auf eine Umwandlungsreihe von mehr als zwei Gliedern anzuwenden, wenn ferner die Grenzbedingungen nicht so einfach sind wie im Falle des Urans, oder wenn die einfache Annahme fallen gelassen wird, daß aus einem Atom erster Art nur ein Atom zweiter Art gebildet wird. Mathematisch betrachtet läuft die radiaoktive Analyse stets darauf hinaus, aus einer Summe von einfachen Exponentialfunktionen die letzteren selbst zu bestimmen. Die mathematische Analyse liefert so eine Reihe von Konstanten λ, denen je ein radioaktives Umwandlungsprodukt zugeordnet wird. Daß dieser Zerlegung eine physikalische Bedeutung zukommt, wird durch die Isolierung der einzelnen Produkte bewiesen, deren radioaktive Konstanten mit den aus der Theorie abgeleiteten übereinstimmen müssen, ferner durch die Unterscheidung ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften. Die Untersuchung der einzelnen Umwandlungsprodukte läßt zugleich erkennen, in welcher Reihenfolge sie auseinander hervorgehen, worüber die mathematische Behandlung allein in der Regel keine Auskunft liefert.

4c) Hydraulische Analogie des Zerfallsprozesses; radioaktive Gleichgewichte. Die Umwandlung eines radioaktiven Stoffes läßt sich nach Rutherford an der Hand einer hydraulischen Analogie veranschaulichen. Die Menge des aus einem zylindrischen Gefäß in der Zeiteinheit durch eine Bodenöffnung abfließenden Wassers ist proportional der Höhe des Wasserstandes, oder der Menge des in dem Gefäße jeweils vorhandenen Wassers. Es gilt also für den Ausfluß des Wassers dasselbe Gesetz, Gleichungen (5) und (4), wie für die Umwandlung eines radioaktiven Stoffes. Die Wassermenge nimmt nach einem Exponentialgesetz ab; die Halbwertszeit ist dem Querschnitte des Gefäßes proportional. Man kann daher die in dem Zylinder vorhandene Wassermenge mit der Menge eines sich umwandelnden radioaktiven Stoffes A und die Ausflußgeschwindigkeit mit der Zerfallsgeschwindigkeit in Parallele setzen, mit welcher der Stoff A sich in einen Stoff B umwandelt.

Um die Umwandlung eines Stoffes A von sehr großer Halbwertszeit, z. B. des Urans, in einen Stoff B von sehr viel kleinerer Halbwertszeit, das Uran-X, die Umwandlung des Uran-X in einen dritten Stoff C usw. zu illustrieren, nehmen wir an, daß aus einem zylindrischen Gefäß A, dessen Querschnitt außerordentlich groß sei im Verhältnis zu seiner Höhe, das Wasser in ein anderes Gefäß B fließe, dessen Querschnitt klein sei gegen den des ersten Gefäßes; aus diesem fließe das Wasser durch eine gleich große Bodenöffnung in ein drittes Gefäß C von wieder anderem Durchmesser usf. In dem ersten Gefäß wird sich wegen seines großen Querschnittes der Wasserstand innerhalb kleiner Zeiträume nicht merklich ändern. Die Geschwindigkeit des Ausflusses aus dem ersten Gefäße bleibt daher merklich konstant. War das Gefäß B ursprünglich nahezu leer, so ist die aus ihm in der Zeiteinheit ausfließende Menge zunächst kleiner als die zufließende Menge; der Wasserstand des Gefäßes B steigt daher an. In dem Maße wie der Wasserstand steigt, wächst jedoch die Ausflußgeschwindigkeit; die Höhe der Wassersäule nimmt daher anfangs schnell, später immer langsamer zu. Ist das Wasser so hoch gestiegen, daß die Ausflußgeschwindigkeit gleich der Zuflußgeschwindigkeit geworden ist, so ändert sich die Menge des in dem Gefäße B vorhandenen Wassers nicht mehr; sie erreicht ein Maximum. Die Kurve, welche den Anstieg des Wassers in dem Gefäße B wiedergibt, gehorcht daher einer Gleichung von der Form der Gleichung (2). In dem Gefäße C finden die entsprechenden Vorgänge statt, bis auch hier das Wasser so hoch gestiegen ist, daß die Abflußgeschwindigkeit gleich der Abflußgeschwindigkeit des ersten Gefäßes geworden ist usf. Nach sehr langer Zeit wird ein Gleichgewichtszustand erreicht, bei welchem aus allen Gefäßen in der Zeiteinheit die gleiche Wassermenge abfließt.

Dem in den Zylindern sich einstellenden Gleichgewicht entspricht das radioaktive Gleichgewicht. Dieses wird dann erreicht, wenn die Umwandlungsprodukte eines sehr langsam zerfallenden Stoffes sich so lange aufgehäuft haben, bis von jedem Produkt in der Zeiteinheit gerade so viele Atome neu gebildet werden, wie durch den Zerfall verschwinden. Die Bedingung des radioaktiven Gleichgewichtes ist also:

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = \ldots\ldots = 0$$

oder nach Gleichung (7)

(9) $$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \ldots$$

Die Mengen der im Gleichgewicht vorhandenen Atome der Zerfallsprodukte sind daher konstant und den radioaktiven Konstanten umgekehrt proportional.

Nimmt die Menge der Muttersubstanz mit der Zeit merklich ab, jedoch mit einer Geschwindigkeit, die klein ist, verglichen mit der Zerfallsgeschwindigkeit der Umwandlungsprodukte, so stellt sich ein sogenanntes stationäres Gleichgewicht ein. Dieses ist dadurch charakterisiert, daß die Mengen sämtlicher Zerfallsprodukte nach demselben Gesetz abnehmen wie die Muttersubstanz, die Mengenverhältnisse sämtlicher Substanzen dagegen konstant bleiben. War ursprünglich allein die Muttersubstanz vorhanden, so nimmt die Menge eines jeden Umwandlungsproduktes relativ schnell zu, erreicht ein Maximum und fällt schließlich gleichen Schrittes mit der Muttersubstanz ab. Ein Beispiel hierfür werden wir bei der Besprechung der Radiumemanation kennen lernen.

In analoger Weise kann man sich eine Vorstellung von den Vorgängen bilden, welche eintreten, wenn eine bestimmte Menge eines schnell zerfallenden Stoffes in ein oder mehrere langsamer zerfallende Produkte sich umwandelt. Während auch hier die späteren Glieder der Umwandlungsreihe ein Maximum passieren, zerfällt das Ausgangsprodukt so schnell, daß es in späteren Phasen des Umwandlungsprozesses keine Rolle mehr spielt. Auf diesen Fall werden wir später bei der Besprechung der sogenannten aktiven Niederschläge zurückkommen.

Historisch sei zu dem vorstehenden Kapitel das Folgende bemerkt. Das Uran-X wurde zuerst von Crookes (1900) von dem Uran getrennt. Fast gleichzeitig gelang Becquerel die Fällung des Uran-X mit Bariumsulfat. Die Beobachtung, daß Uran-X nach einiger Zeit seine Aktivität verliert, während das Uran seine verlorene Aktivität zurückgewinnt, ist 1901 von Becquerel gemacht worden. Die Geschwindigkeit, mit der diese Aktivitätsänderungen vor sich gehen, wurde von Rutherford und Soddy 1903 bestimmt, die zugleich an der Hand der von ihnen aufgestellten Zerfallstheorie die Erklärung der Erscheinungen gaben. Eine eingehende Darstellung der Zerfallstheorie findet sich in den am Schlusse aufgeführten Lehrbüchern und in Rutherfords Bakerian Lecture (Phil. Trans. Roy. Soc. A 204, p. 169, 1904).

5. Umwandlungsreihe des Radiums. 5a) Radium. Das Radium ist im Jahre 1898 von P. und S. Curie und H. Bémont entdeckt worden. Die Hauptquelle für seine Gewinnung bilden die Rückstände der Joachimstaler Pechblende. Bei der chemischen Aufarbeitung der Rückstände folgt das Radium den Reaktionen des Bariums, von dem es schließlich durch fraktionierte Kristallisation der Chloride oder Bromide getrennt wird. Als Indikator, mit dessen Hilfe entschieden werden kann, ob bei einer Fällung das Radium gefällt wird oder in Lösung bleibt, hat M^me Curie das Elektroskop benutzt. Da die spezifische Aktivität des Radiums etwa zwei millionenmal größer ist als die des Urans, gelingt es nach der elektrischen Methode leicht, den Verbleib auch verschwindend geringer Radiummengen festzustellen.

Radiumsalze sind jetzt in Mengen von mehreren Grammen rein dargestellt worden, so daß die Untersuchung ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften keine besonderen Schwierigkeiten mehr bietet. Abgesehen von seinem hohen Strahlungsvermögen verhält sich das Radium in jeder Beziehung wie ein anderes chemisches Element. Das Radium gehört zu der Gruppe der Erdalkalimetalle, es ist zweiwertig und in seinem chemischen Verhalten dem Barium sehr ähnlich. Sein zuerst von M^me Curie zu 225 bestimmtes Atomgewicht beträgt nach der neuesten Untersuchung von Hönigschmid (Wien. Anz. 1911) 225,95. In metallischer Form ist das Radium 1910 von M^me Curie und Debierne dargestellt worden. Radiumsalze färben die Bunsenflamme karminrot und liefern ein charakteristisches Flammen- und Funkenspektrum (Runge und Precht, Ann. de Chim. et de Phys. 1904).

Ein Radiumpräparat enthält in der Regel nicht nur das Radium selbst, sondern auch die Umwandlungsprodukte des Radiums. Die radioaktiven Eigenschaften des Radiums selbst lassen sich daher nur an einem Präparat beobachten, aus dem die Umwandlungsprodukte zuvor entfernt sind. Wir werden deshalb die radioaktiven Eigenschaften des Radiums selbst erst nach der Behandlung seiner Umwandlungsprodukte besprechen. Hier sei bereits bemerkt, daß ein von den Umwandlunsgprodukten befreites Radiumpräparat eine kräftige α-Strahlung und eine

weiche β-Strahlung (Hahn und Meitner, Phys. Zeitschr. 1909) aussendet.

5b) **Radiumemanation.** Läßt man in ein evakuiertes Elektroskop ein Luftquantum eintreten, das zuvor die Lösung eines Radiumsalzes durchperlt hat, so beobachtet man, daß das geladene Goldblattsystem sehr schnell seine Ladung verliert.

Die Stärke des mit dem Elektroskop gemessenen Ionisationsstromes nimmt, wenn wir von einer schnellen anfänglichen Zunahme zunächst absehen, nach einem Exponentialgesetz mit der Zeit ab, und zwar so, daß die Stromstärke in 3,85 Tagen auf ihren halben Wert sinkt. Wird nach Verlauf einiger Tage das Elektroskop gelüftet, so sinkt der Ionisationsstrom sehr schnell und fällt in wenigen Stunden auf den Wert des natürlichen Ladungsverlustes. Die elektrische Leitfähigkeit der eingesogenen Luft ist um so größer, je mehr Radium die Lösung enthält; bei einer Uranlösung tritt der Effekt nicht auf. Der Versuch läßt sich ähnlich wie die Abscheidung des Uran-X aus Uransalzen beliebig oft wiederholen.

Diese Beobachtungen werden offenbar am einfachsten durch die Annahme gedeutet, daß die Radiumlösung die Fähigkeit besitzt, kontinuierlich einen gasförmigen radioaktiven Stoff zu erzeugen, der mit einer Halbwertszeit von 3,85 Tagen zerfällt. Durch das Lüften des Elektroskops wird der noch nicht zerfallene Rest des radioaktiven Gases entfernt. Der anfängliche schnelle Anstieg der Aktivität und der Umstand, daß nach dem Ausblasen des aktiven Gases die Aktivität nicht sofort verschwindet, läßt sich, wie im Abschnitt 5c gezeigt wird, auf das Entstehen und Verschwinden von Zerfallsprodukten des Gases zurückführen.

Radioaktive Stoffe, die bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig sind, werden nach Rutherford, der an Thoriumpräparaten zuerst (1900) das Auftreten eines radioaktiven Gases beobachtete, Emanationen genannt. Außer dem Thorium und Radium (Dorn 1900) besitzt noch das Aktinium (Giesel 1902, Debierne 1903) die Fähigkeit, eine Emanation abzugeben. Jede der drei Emanationen besitzt eine charakteristische radioaktive Konstante, und zwar zerfällt die Emanation des Thoriums in 53 Sek. zur Hälfte, die des Aktiniums in 3,9 Sek. Die beiden letzteren Emanationen zerfallen also außerordentlich viel schneller als die Radiumemanation.

Entemaniertes d. h. von der Emanation befreites Radium besitzt nur etwa 25 % seiner normalen Aktivität und gewinnt diese nach einem Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 3,85 Tagen zurück. Die Abfallskurve der Emanation und die Erholungskurve des Radiums sind also komplementär wie die Abfalls- und Erholungskurven des Uran-X. In analoger Weise wie in dem Falle des Uran-X läßt sich der Zusammenhang zwischen der Abfallskurve der Emanation und der Erholungskurve des Radiums durch die Annahmen erklären, daß die Emanation ununterbrochen nach dem Gesetz der unimolekularen Reaktionen zerfällt, und daß eine dauernde Produktion der Emanation durch das Radium stattfindet. Diesen Prozeß können wir uns am einfachsten so vorstellen, daß aus einem Radiumatom durch die Abgabe einer α-Partikel ein Atom der Emanation entsteht. Der Beweis für die Richtigkeit dieser Annahme wird im Abschnitt 8 geführt werden.

Um Radium zu entemanieren, kann man durch die Lösung eines Radiumsalzes Luft leiten oder sie zum Kochen bringen, oder schließlich ein festes Radiumsalz zur Rotglut erhitzen. Infolge der Entfernung der aktiven Emanation sinkt die Aktivität des Radiums. Es gelingt jedoch nicht, dem Radium mehr als 75 % seiner Aktivität zu entziehen, zu der Gesamtaktivität des Radiums im Gleichgewichtszustande trägt also das Radium selbst etwa 25 % bei. In dem Maße, wie die durch Zerfall des Radiums neu entstehende Emanation sich aufspeichert, gewinnt das Radium seine Aktivität zurück, bis nach etwa einem Monat der Zustand des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen dem Radium und der Emanation erreicht ist.

Da im Gleichgewichtszustande die Menge der Emanation der Menge des Radiums proportional ist, läßt sich der Radiumgehalt eines Körpers aus der von ihm im Gleichgewichtszustande abgegebenen Emanationsmenge, bezw. der von dieser hervorgerufenen Ionisation, bestimmen. Zu diesem Zwecke bringt man das Präparat, dessen Radiumgehalt bestimmt werden soll, in Lösung und bewahrt die Lösung in einem gut verschlossenen Gefäße auf. Nach etwa einem Monat wird die Emanation in ein Ionisationsgefäß übergeführt und der Sättigungsstrom zu verschiedenen Zeiten bestimmt. Trägt man die Ablesungen in ein Koordinatensystem ein, dessen Abszissen die Zeit in Tagen, dessen Ordinaten die Logarithmen der Aktivität bezeichnen, so erhält man, von der anfänglichen schnellen Zunahme der Aktivität abgesehen, eine gerade Linie, entsprechend dem exponentiellen Zerfall der Emanation. Durch Rückwärtsverlängerung dieser Geraden bis zu ihrem Schnitt mit der Ordinatenachse ergibt sich der Wert des Sättigungsstromes zur Zeit des Eintritts der Emanation in das Ionisationsgefäß. Wiederholt man den Versuch mit einer Lösung von bekanntem Radiumgehalt, so läßt sich

aus den beiden Anfangswerten des Sättigungsstromes und der in der Vergleichslösung enthaltenen Radiummenge der gesuchte Radiumgehalt berechnen. Diese Methode gestattet, auch sehr geringe Radiummengen exakt zu bestimmen. Sie ist vielfach zur Untersuchung des Radiumgehaltes von Mineralien, Gesteinsproben, Quellwässern usw. angewendet worden. Apparate zur Ausführung derartiger Messungen sind von Elster und Geitel, Engler und Sieveking, H. W. Schmidt, Mache und Meyer u. a. konstruiert worden. Nach einer ähnlichen Methode lassen sich auch Thorium- und Aktiniumbestimmungen ausführen.

Zur Bestimmung des Radiumgehaltes stark aktiver Präparate bedient man sich der im Abschnitt 5d beschriebenen „γ-Strahlenmethode", welche vor der „Emanationsmethode" den Vorzug besitzt, daß sie eine Auflösung des Präparates nicht erforderlich macht.

5e) Der aktive Niederschlag des Radiums. Wenn Radiumemanation, wie in dem vorhergehenden Kapitel beschrieben, in eine geschlossene Ionisationskammer eingeführt ist, so nimmt die Aktivität mehrere Stunden lang bis auf etwa das Doppelte ihres Anfangswertes zu. Nach dem Ausblasen der Emanation behält das Ionisationsgefäß zunächst noch eine beträchtliche Aktivität zurück, die jedoch in wenigen Stunden abklingt. Die anfängliche Zunahme der Aktivität rührt davon her, daß aus der Emanation sukzessive mehrere neue aktive Stoffe entstehen. Diese bleiben bei dem Ausblasen der Emanation zurück, sie verhalten sich also wie feste Körper, die sich auf den Wänden der Kammer niedergeschlagen haben. Man bezeichnet sie daher mit dem Namen aktiver Niederschlag des Radiums oder der Radiumemanation; die von ihnen hervorgerufene Aktivität nennt man die induzierte Aktivität. Nach der Entfernung ihrer Muttersubstanz, der Emanation, verschwinden die Stoffe schnell, indem sie sich in einen schwach aktiven Stoff umwandeln.

Um die Richtigkeit dieser Erklärung zu beweisen, ist zu zeigen, daß ein Körper, der von Radiumemanation umspült wird, sich mit einem materiellen radioaktiven Ueberzug bedeckt, und daß die Aktivität des aktiven Niederschlages stets proportional der Aktivität der vorhandenen Emanation ist.

Läßt man in einem geschlossenen Gefäß die Emanation, welche von einer Lösung eines Radiumsalzes a (Fig. 15) abgegeben wird, auf die in verschiedenen Stellungen angebrachten Platten A, B, C, D, E etwa einen Tag lang einwirken, so beobachtet man, daß alle Platten aktiv geworden sind, auch die Platte D, welche gegen die direkte Strahlung des Radiums durch die Bleiplatte P geschützt ist. Hieraus geht hervor, daß die induzierte Aktivität nicht durch die von dem Radium ausgehende Strahlung hervorgerufen wird.

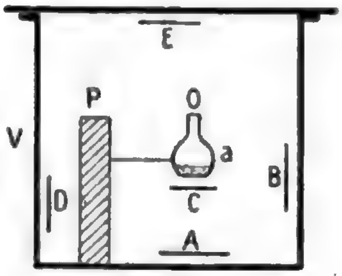


Fig. 15.

Reibt man eine aktive Platte mit einem Tuch, so geht die Aktivität von der Platte auf das Tuch über, was sich leicht mit Hilfe eines Elektroskopes oder eines Fluoreszenzschirmes erkennen läßt. Beim Behandeln einer aktiv gemachten Metallplatte mit Säuren verliert die Platte ihre Aktivität zum größten Teile. Die Aktivität geht an die Lösung über, wie sich nach dem Eindampfen der Lösung leicht zeigen läßt. Erhitzt man einen durch die Berührung mit der Emanation aktiv gemachten Körper auf helle Rotglut, so verschwindet seine Aktivität zum größten Teile, während kalte Gegenstände, die sich in der Nachbarschaft des erhitzten Körpers befinden, aktiv werden. Aus diesen Beobachtungen geht hervor, daß die induzierte Aktivität auf der Anwesenheit geringer Mengen eines stark aktiven Stoffes beruht.

Eine Radiumlösung, aus der die Emanation entfernt ist, besitzt die Fähigkeit, einen aktiven Niederschlag zu bilden, nicht mehr, gewinnt sie aber in dem Maße zurück, wie die Emanation sich aufspeichert. Nach Erreichung des Gleichgewichtszustandes ist in einer mit emanationshaltiger Luft gefüllten Ionisationskammer das Verhältnis zwischen der Aktivität der Emanation und der Aktivität des nach Entfernung der Emanation zurückbleibenden aktiven Niederschlages stets das gleiche, einerlei, wie groß die verwendete Emanationsmenge war. Die Menge des aktiven Niederschlages ist also stets der Menge der Emanation proportional, wie es zu erwarten ist, wenn zwischen der Emanation und dem aktiven Niederschlag ein genetischer Zusammenhang besteht.

Um einem Körper, z. B. einem Drahtstückchen, induzierte Aktivität zu erteilen, verwendet man ihn mit Vorteil als negative Elektrode eines elektrischen Feldes, das man in der emanationshaltigen Atmosphäre erzeugt. Wie bereits im Abschnitt 3d erwähnt ist, sammelt sich dann unter gewöhn-

lichen Bedingungen des Druckes der aktive Niederschlag fast ausschließlich auf der negativen Elektrode an. Die aus dem Zerfall der Emanationsatome entstehenden Teilchen verhalten sich wie positiv geladene Ionen.

Exponiert man einen Draht mehrere Tage lang einer größeren Menge von Radiumemanation und verfolgt, wie seine Aktivität nach Beendigung der Exposition mit der Zeit sich ändert, so beobachtet man, daß die Aktivität innerhalb des ersten Tages sehr schnell sinkt, nach etwa 24 Stunden einen Minimalwert erreicht, der in der Regel weniger als ein Millionstel der Anfangsaktivität beträgt und dann mehrere Jahre lang langsam wieder ansteigt. Der Verlauf der Aktivitätskurve hängt von der Dauer der Exposition ab, und die Kurven der α-Strahlenaktivität sind von denen der β- und γ-Strahlenaktivität verschieden. Die genauere Untersuchung dieser Erscheinungen hat zu dem Ergebnis geführt, daß der aktive Niederschlag mindestens 6 aktive Substanzen enthält, die Ra-A, Ra-B usw. genannt worden sind. Die drei ersten Stoffe werden unter dem Namen des „schnell zerfallenden aktiven Niederschlages" zusammengefaßt; auf ihnen beruhen im wesentlichen die innerhalb der ersten 24 Stunden nach Beendigung der Exposition auftretenden Erscheinungen. Die Stoffe Ra-D bis Ra-F bilden den „langsam zerfallenden aktiven Niederschlag", die Wirkung dieser Stoffe macht sich erst bemerkbar, nachdem der schnell zerfallende Niederschlag praktisch verschwunden ist.

5d) Umwandlungen des schnell zerfallenden aktiven Niederschlages. α) Bestandteile des schnell zerfallenden aktiven Niederschlages. Nach der Zerfallstheorie enthält jedes aktive Präparat, dessen Aktivitätskurve einem einfachen Exponentialgesetz gehorcht, einen radioaktiven Stoff, dessen Zerfall mit derselben Halbwertszeit erfolgt wie der Abfall der Aktivitätskurve. Um daher die Bestandteile des schnell zerfallenden aktiven Niederschlages des Radiums kennen zu lernen, gehen wir von Versuchen aus, aus dem Niederschlage Präparate herzustellen, die ihre Aktivität ganz oder teilweise nach einem einfachen Exponentialgesetz verlieren.

Verfolgt man die α-Strahlenaktivität eines Drahtes, der nur 1 Minute lang der Emanation exponiert war, so findet man, daß sie zunächst sehr angenähert nach einem Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 3 Minuten sinkt. Nach 20 Minuten beträgt die Aktivität nur noch etwa ein Zehntel ihres Anfangswertes, sie behält diesen Wert etwa 20 Minuten lang und fällt schließlich nach einem Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 26,7 Minuten ab. Wir werden hieraus schließen, daß der aktive Niederschlag zwei radioaktive Stoffe enthält, die mit den Halbwertszeiten 3,0 bezw. 26,7 Minuten zerfallen. Wir wollen die durch diese Halbwertszeiten charakterisierten Stoffe Radium-A und Radium-B nennen. Der Verlauf der Aktivität ist durch die Kurve I Figur 16 graphisch wiedergegeben.

Taucht man in eine salzsaure Lösung des aktiven Niederschlages des Radiums ein Nickelblech, so schlägt sich auf ihm, wie zuerst v. Lerch nachgewiesen hat, ein radioaktiver Stoff nieder, dessen Aktivität nach einem einfachen Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 19,5 Minuten abnimmt. Auch durch Erhitzung eines aktiven Drahtes auf Temperaturen über 600° gelingt es, diesen Stoff zu isolieren. Der durch die Halbwertszeit von 19,5 Minuten charakterisierte Stoff sei Radium-C genannt.

β) Aenderung der Aktivität nach kurzer Exposition. Wir haben nunmehr zu untersuchen, in welchem Zusammenhange die drei Stoffe Ra-A, Ra-B und Ra-C miteinander und mit der Emanation stehen.

Die Beobachtung, daß schon bei ganz kurzer Exposition eine beträchtliche Menge von Radium-A sich auf dem Drahte sammelt, führt zu der Annahme, daß Ra-A der erste feste Stoff ist, der sich aus der Emanation bildet. Wir werden daher Ra-A als das erste Umwandlungsprodukt der Emanation ansehen und, indem wir der früher angewandten Schlußweise folgen, annehmen, daß aus dem Emanationsatom durch Abgabe einer α-Partikel ein Atom des Ra-A entsteht.

Ra-A sendet nur α-Strahlen aus. Untersucht man nämlich auch die β- und γ-Strahlenaktivität eines Drahtes, der nur 1 Minute lang der Emanation exponiert war, so erhält man in beiden Fällen eine Kurve, wie sie durch die Kurve II der Figur 16 dargestellt ist. Die β-Strahlenaktivität ist anfangs, also zu einer Zeit, in der die maximale Menge von Ra-A vorhanden ist, praktisch gleich Null. Ra-A sendet daher weder β- noch γ-Strahlen aus.

Die β- und γ-Strahlenaktivität steigt anfangs schnell an, erreicht in etwa 35 Minuten ein Maximum und fällt schließlich mit einer Halbwertszeit von 26,7 Minuten exponentiell ab. Mehrere Stunden nach der Entfernung des Drahtes aus der Emanation verändern sich also sowohl die α- wie die β- und γ-Strahlenaktivitäten in der gleichen Weise, sie klingen exponentiell mit der Halbwertszeit von 26,7 Minuten ab. Die anfängliche Zunahme der β- und γ-Strahlenaktivität beweist, daß aus dem Zerfall des Ra-A ein oder mehrere aktive Stoffe ent-

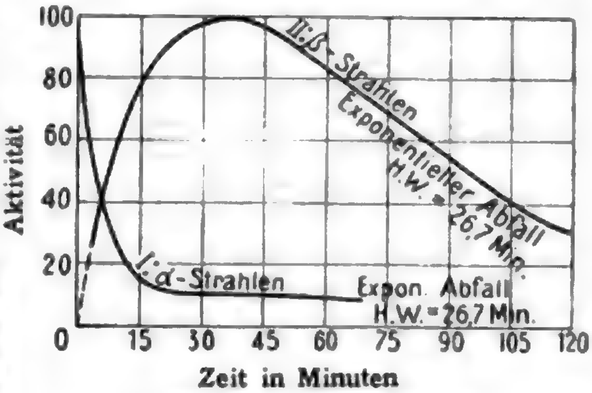
stehen, welche β- und γ-Strahlen aussenden, während aus dem Umstande, daß schließlich sowohl die α-Strahlen wie die β- und γ-Strahlenaktivität nach dem gleichen Gesetze abklingen, hervorgeht, daß von einem oder mehreren der aus der Umwandlung von Ra-A entstehenden Stoffe auch α-Strahlen ausgesandt werden.

Die Aktivität des Ra-C nimmt, wie erwähnt, nach einem einfachen Exponentialgesetz ab, bis sie auf einen verschwindend geringen Bruchteil ihres Anfangswertes gesunken ist. Daher ist Ra-C als das letzte aktive Glied in der Umwandlungsreihe des schnell zerfallenden aktiven Niederschlages anzusehen. Die Form der Abklingungskurve des Ra-C ist die gleiche, einerlei, ob es sich um die Untersuchung der α-, β- oder γ-Strahlenaktivität handelt; das Ra-C sendet also alle drei Arten von Strahlen aus.

Unter der Voraussetzung, daß nur die drei erwähnten Produkte in dem aktiven Niederschlage enthalten sind und daß sie untereinander in genetischem Zusammenhange stehen, haben wir also anzunehmen, daß Ra-A das Anfangs- und Ra-C das Endglied der Reihe bildet, und also Ra-B aus Ra-A entsteht und sich in Ra-C umwandelt.

Daß Ra-C aus Ra-B entsteht, läßt sich nach v. Lerch in folgender Weise wahrscheinlich machen. In eine salzsaure Lösung des aktiven Niederschlages, aus der alles Ra-A durch Zerfall verschwunden ist, taucht man in bestimmten Intervallen Nickelbleche eine bestimmte Zeit lang ein und mißt ihre Aktivität sofort nach der Herausnahme. Auf den Blechen schlägt sich, wie erwähnt, Ra-C nieder. Die Anfangsaktivitäten werden mit der Zeit immer kleiner, und zwar nehmen sie nach einem Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 26,7 Minuten ab. Nach diesem Gesetz verändert sich aber auch die Menge des in der Lösung vorhandenen Ra-B. Die Menge des auf den Nickelblechen niedergeschlagenen Ra-C ist also der jeweils vorhandenen Menge von Ra-B proportional, was darauf deutet, daß Ra-C aus Ra-B entsteht.

Nach der Vorstellung, die wir uns von dem Zusammenhange zwischen Ra-A, -B und -C gebildet haben, enthält also ein kurze Zeit der Emanation exponierter Draht praktisch nur das direkte Zerfallsprodukt der Emanation, Ra-A. Da dieses α-Strahlen, aber keine β- und γ-Strahlen aussendet, ist anfangs die α-Strahlenaktivität hoch, die β- und γ-Strahlenaktivität dagegen gering. Infolge des schnellen Zerfalles von Ra-A nimmt die α-Strahlenaktivität schnell ab. In dem Maße, wie Ra-A zerfällt, entsteht Ra-B, und aus diesem wieder Ra-C. Die Menge von Ra-B sowohl wie von Ra-C muß daher zunächst zunehmen, ein Maximum erreichen und dann infolge des Zerfalles der beiden Stoffe wieder abnehmen. Dem entspricht der Verlauf der Kurve II in Figur 16, welche die Superposition der von



Expositionszeit 1 Minute

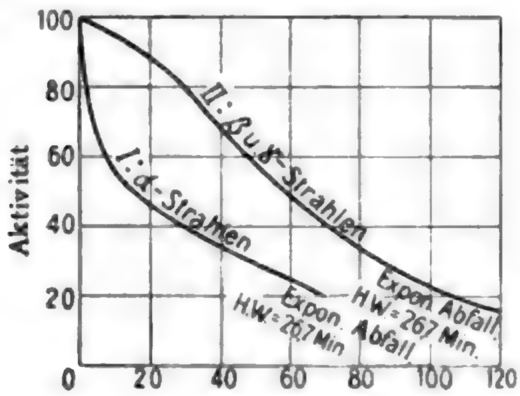
Fig. 16.

Ra-B und Ra-C erzeugten β- bezw. γ-Strahlenaktivität darstellt.

Es erscheint auf den ersten Blick auffallend, daß der schließliche Abfall der Kurven der Figur 16 nicht mit der Halbwertszeit von 19,5 Minuten des letzten aktiven Stoffes Ra-C, sondern mit der Halbwertszeit 26,7 Minuten des vorletzten Gliedes erfolgt. Hierin liegt jedoch kein Widerspruch gegen die Annahme, daß Ra-C aus Ra-B entsteht. Nach Zerfall des Ra-A wächst nämlich die Menge des Ra-C durch Zerfall des Ra-B so lange bis gerade soviel Ra-C in der Zeiteinheit neu entsteht, wie durch den Zerfall verschwindet: d. h. bis stationäres radioaktives Gleichgewicht zwischen Ra-B und Ra-C sich eingestellt hat. Von diesem Zeitpunkt ab ist nach Abschnitt 4c die Menge des vorhandenen Ra-C stets der von Ra-B proportional, und da diese mit der Halbwertszeit von 26,7 Minuten zerfällt, so muß die Gesamtaktivität mit dieser Halbwertszeit abklingen.

γ) Aenderung der Aktivität nach langer Exposition. Eine Kontrolle unserer Schlüsse ergibt sich aus den Abfallskurven, die nach langer Exposition erhalten werden. Hierbei wird die Expositionszeit als lang bezeichnet, wenn sie zur Herstellung des Gleichgewichtes zwischen der Emanation und dem aktiven Niederschlag hinreicht, wozu etwa 5 Stunden erforderlich sind. Wir werden erwarten, daß auch nach langer Exposition die Kurven schließlich mit der Halbwertszeit von 26,7 Minuten exponentiell abnehmen. Die α-Strahlenaktivität wird anfangs infolge des schnellen Zerfalles von Ra-A wiederum schnell sinken, jedoch nicht so tief wie nach kurzer Exposition, weil jetzt das α-Strahlen aussendende Ra-C von Anfang an in größerer Menge vorhanden ist. Die

Kurve der β- und γ-Strahlenaktivität wird nach langer Exposition kein Maximum mehr aufweisen, sondern von Beendigung der Exposition ab stets sinken, weil Ra-B und Ra-C bereits anfangs in der Gleichgewichtsmenge vorhanden sind. Diese Forderungen werden durch die experimentellen Beobachtungen in der Tat erfüllt, wie aus der Figur 17 hervorgeht, in der die Kurven der



Zeit in Minuten

Expositionszeit 24 Stunden

Fig. 17.

α- bezw. β- und γ-Strahlenaktivität eines Drahtes dargestellt sind, der 24 Stunden lang der Emanation exponiert war.

Die Frage, welche Strahlen von Ra-B ausgesandt werden, haben wir bisher noch nicht berührt. Aus der Kurve der α-Strahlenaktivität nach kurzer Exposition folgt, daß Ra-B keine α-Strahlen aussendet, da sonst der anfängliche schnelle Abfall der Kurve nicht möglich wäre. Die qualitative Diskussion der β- und γ-Strahlenkurven gibt über die Frage, ob Ra-B β- und γ-Strahlen aussendet, keine Auskunft, da die Strahlung des Ra-B nie für sich beobachtet wird, sondern stets zugleich mit der des Ra-C. Die quantitative Behandlung zeigt jedoch, daß das Ra-B eine weiche β-Strahlung (H. W. Schmidt) und eine geringe γ-Strahlung (Moseley und Makower, Phil. Mag. 1912) aussendet, durch welche bewirkt wird, daß das Maximum der Kurve II Figur 16, in Uebereinstimmung mit der Beobachtung, zu einer früheren Zeit erreicht wird, als sich aus der Berechnung unter der Annahme, Ra-B sei strahlenlos, ergeben würde. Weitere Auskunft über die von Ra-B ausgesandten Strahlen erhält man, wenn man die Strahlung von Ra-B + Ra-C mit der von Ra-C allein vergleicht. Daß die Zerfallsgeschwindigkeit der Bestandteile des aktiven Niederschlages bis zu Temperaturen von 1500° von der Temperatur unabhängig ist, ist von Bronson und H. W. Schmidt und Cermak gezeigt

Die Zerfallstheorie erlaubt ohne Schwierigkeiten, die in dem aktiven Niederschlage sowohl nach kurzer wie nach langer Exposition jeweils vorhandenen Mengen von Ra-A, -B und -C aus den Halbwertszeiten von 3, 26,7 und 19,5 Minuten zu bestimmen, und hieraus den Verlauf der Aktivitätskurven zu berechnen, wenn angenommen wird, daß aus jedem Atom von Ra-A bei seinem Zerfall nur ein Atom von Ra-B und aus diesem wieder nur ein Atom von Ra-C entsteht. Eine von Bronson ausgeführte Untersuchung hat eine vorzügliche Uebereinstimmung zwischen den berechneten und den von ihm experimentell ermittelten Werten ergeben. Die oben behandelte qualitative Analyse des aktiven Niederschlages erhält durch diese Versuche ihre exakte Bestätigung.

Die Veränderungen, welche die Mengen von Ra-A, Ra-B und Ra-C nach 1 Minute Expositionsdauer erfahren, sind in Figur 18 graphisch wiedergegeben. Ra-A nimmt rein exponentiell ab, Ra-B erreicht nach etwa 10 Minuten und Ra-C nach etwa 36 Minuten seinen maximalen Wert.

In einem im radioaktiven Gleichgewichte befindlichen Radiumpräparate ist nach Abschnitt 4c die Anzahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Atome für jedes Glied der Umwandlungsreihe gleich groß. Wenn daher die einfache Annahme zutrifft, daß bei einer α-Strahlenumwandlung von jedem Atom des zerfallenden Stoffes nur eine α-Partikel ausgesandt wird, so sollte im Gleichgewichte sowohl von dem Radium wie von jedem seiner α-Strahlen aussendenden Umwandlungsprodukte die gleiche Anzahl von α-Partikeln ausgesandt werden. Einen sehr anschaulichen Beweis für die Richtigkeit dieser Annahme liefert die in Figur 19 nach Versuchen von Bragg und Kleeman darge-

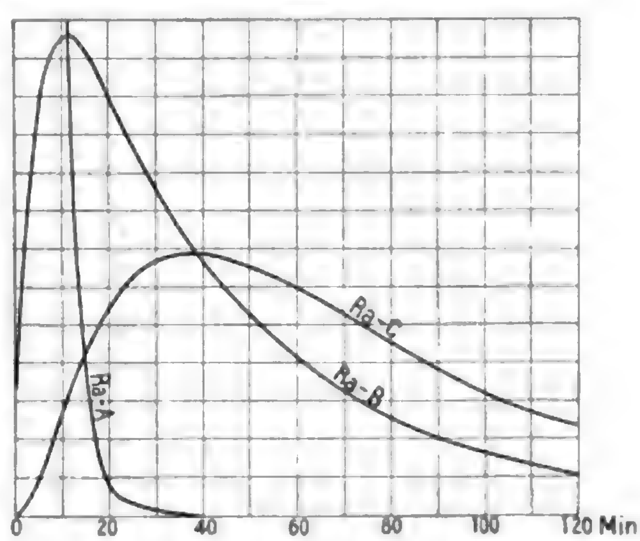


Fig. 18.

stellte Ionisationskurve (vgl. Abschnitt 3c) einer dünnen Radiumschicht, in welcher Gleichgewicht zwischen dem Radium und seinen schnell zerfallenden Umwandlungsprodukten herrscht. Die in der Kurve auftretenden Knicke entsprechen den Reichweiten der einzelnen Gruppen von α-Strahlen.

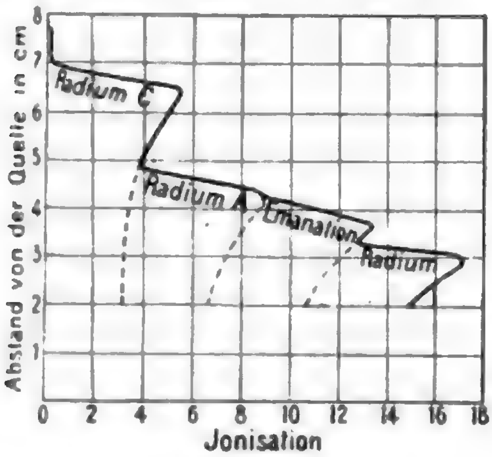


Fig. 19.

Man erkennt, daß sich die Kurve aus vier gleichen Teilen zusammensetzt, die den Ionisationskurven des Radiums, der Emanation, des Ra-A und Ra-C entsprechen. Aus der Ionisationskurve des Ra-C z. B. läßt sich durch einfache Verschiebung die ganze Ionisationskurve konstruieren. Abgesehen von den Anfangsgeschwindigkeiten der α-Partikeln sind daher die Ionisationskurven des Radiums und aller seiner Produkte identisch, was offenbar nur möglich ist, wenn alle α-Strahlenprodukte in der Zeiteinheit die gleiche Anzahl von α-Partikeln aussenden. Die Figur liefert ferner den Beweis, daß andere α-Strahlenprodukte als die besprochenen nicht vorhanden sind.

Von den Umwandlungsprodukten des Radiums sendet allein das Ra-C γ-Strahlen von hohem Durchdringungsvermögen aus. Die Intensität der durchdringenden Strahlung eines radiumhaltigen Präparates liefert daher ein Maß für die Menge des in dem Präparat enthaltenen Ra-C. Da im Gleichgewichtszustande die Menge des Ra-C proportional sowohl der Menge der Emanation wie der des Radiums ist, so liefert die Messung der durchdringenden Strahlung eines im Gleichgewicht befindlichen Radiumpräparates zugleich ein Maß für die Menge des vorhandenen Radiums, bezw. der vorhandenen Emanation. Vergleicht man daher die γ-Strahlenaktivität eines Radiumstandards mit derjenigen eines Präparates von unbekanntem Radiumgehalt, so läßt sich der gesuchte Radiumgehalt des letzteren sofort angeben. In ähnlicher Weise liefert die γ-Strahlenaktivität einer etwa in einem Glasrohr eingeschlossenen Emanationsmenge ein Maß für die Radiummenge, mit der das Emanationsquantum im Gleichgewicht stehen würde. Nach dieser „γ-Strahlen-Methode" genannten Methode der Bestimmung des Radiums werden neuerdings Eichungen von Radiumpräparaten mit Hilfe eines internationalen Radiumstandards ausgeführt (vgl. den Bericht der Internationalen Radiumstandardkommission, Phys. Zeitschr. 13, S. 524, 1912).

Die bisherigen Ergebnisse der Analyse der Zerfallsreihe des Radiums sind in dem Diagramm der Figur 20 zusammengefaßt.

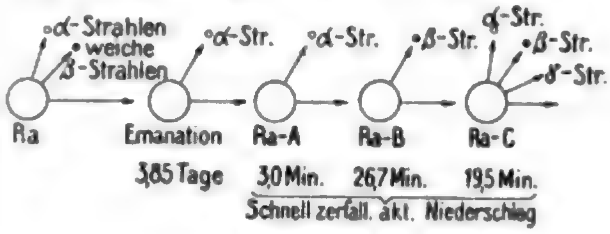


Fig. 20.

5e) **Umwandlungen des langsam zerfallenden aktiven Niederschlages des Radiums.** α) **Bestandteile des langsam zerfallenden aktiven Niederschlages und ihr Zusammenhang.** Die Aktivität eines Drahtes, welcher der Radiumemanation einige Stunden lang exponiert war, sinkt, wie wir gesehen haben, innerhalb eines Zeitraumes von 24 Stunden nach Beendigung der Exposition auf weniger als ein Hunderttausendstel ihres Anfangswertes. Die Größe dieser Restaktivität nimmt mit der Menge der Emanation und der Dauer der Exposition zu. Die von Rutherford durchgeführte Analyse dieser Restaktivität hat zu dem Nachweis geführt, daß mit der Umwandlung des Ra-C der Umwandlungsprozeß des Radiums sein Ende noch nicht erreicht hat, sondern daß durch den Zerfall des Ra-C nacheinander drei neue radioaktive Stoffe Ra-D, Ra-E und Ra-F entstehen, welche den „langsam zerfallenden aktiven Niederschlag" bilden. Der Beweis, daß die Restaktivität von einem aktiven Niederschlage materieller Natur herrührt, kann in ähnlicher Weise geführt werden, wie bei dem schnell zerfallenden aktiven Niederschlag. Der Niederschlag läßt sich bei hohen Temperaturen verflüchtigen und von einem der Emanation exponiert gewesenen Gegenstande durch Säuren lösen.

Aus einer alten Lösung des aktiven Niederschlages schlägt sich auf einem Wismutblech ein aktiver Stoff nieder, der nur α-Strahlen aussendet und nach einem einfachen Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 136 Tagen zerfällt; dieser Stoff sei Ra-F genannt. Aus derselben

Lösung erhält man, nachdem man sie zum Kochen erhitzt hat, auf einem Nickelblech den Niederschlag eines Stoffes, der vorwiegend β- und γ-Strahlen aussendet und seine β- und γ-Strahlenaktivität nach einem einfachen Exponentialgesetz mit einer Halbwertszeit von 5,0 Tagen verliert. Der durch die Halbwertszeit von 5,0 Tagen charakteristische Stoff wird Ra-E genannt. Die anfänglich schwache α-Strahlenaktivität des Ra-E nimmt im Gegensatz zu seiner β- und γ-Strahlenaktivität mit der Zeit nicht ab, sondern zunächst zu. Diese Zunahme beruht darauf, daß aus dem Ra-E bei seinem Zerfall Ra-F entsteht, wie sich leicht durch Abscheidung des Ra-F nach der eben beschriebenen Methode zeigen läßt.

Ein älteres Präparat des aktiven Niederschlages enthält nach diesen Beobachtungen mindestens zwei aktive Stoffe, Ra-E und Ra-F. Ra-E wandelt sich unter Aussendung von β- und γ-Strahlen mit einer Halbwertszeit von 5,0 Tagen in Ra-F um, welches nur α-Strahlen emittiert und mit einer Halbwertszeit von 136 Tagen zerfällt. Das Umwandlungsprodukt des Ra-F ist nach unseren bisherigen Kenntnissen inaktiv, und wird daher als das Schlußglied der Zerfallsreihe des Radiums angesehen.

Um die Frage nach dem Ursprung des Ra-E zu beantworten, verfolgen wir die Aenderung, welche die β-Strahlenaktivität des aktiven Niederschlages mit der Zeit erfährt. Nach dem Zerfall von Ra-A -B und -C ist die β-Strahlenaktivität des Niederschlages zunächst sehr klein, sie wächst dann an und erreicht nach etwa 40 Tagen ein Maximum. Die Kurve besitzt eine ähnliche Form wie die Erholungskurve des Uran-X, sie gehorcht wie diese einer Gleichung von der Form

$$\frac{J}{J_\infty} = 1 - e^{-\lambda t},$$

worin der Wert λ der Halbwertszeit von Ra-E, 5,0 Tagen, entspricht. Hieraus geht hervor, daß das Ra-E, wie das Uran-X, aus einem Stoffe von relativ großer Halbwertszeit entsteht. Dieser Stoff sei Ra-D genannt.

Die Halbwertszeit des Ra-D hat bisher wegen der Langsamkeit des Zerfalls von Ra-D nicht direkt bestimmt werden können. Sie läßt sich jedoch aus der Anstieggeschwindigkeit der α-Strahlenaktivität berechnen. Die α-Strahlenaktivität des aktiven Niederschlages nimmt mehrere Jahre lang zu, nachdem sie in den ersten Tagen nach Beendigung der Exposition ein Minimum passiert hat. Ihr geringer Minimalwert zeigt, daß Ra D α-Strahlen nicht aussendet; dagegen ist von Bayer, Hahn und Meitner (Phys. Zeitschr. 1911) auf photographischem Wege nachgewiesen worden, daß von Ra-D eine weiche β-Strahlung ausgeht. Da, wie wir gesehen haben, aus Ra-D Ra-E, und aus diesem wieder das α-Strahlen aussendende Ra-F entsteht, so beruht der Anstieg der Kurve der α-Strahlenaktivität auf der allmählichen Entstehung von Ra-F. Aus der rechnerischen Verwertung der Entstehungsgeschwindigkeit von Ra-F ergibt sich für die Halbwertszeit von Ra-D ein Wert von etwa 16,5 Jahren (Antonoff, Phil. Mag. 1910).

β) Identität von Ra-F, Polonium und Radiotellurium, sowie von Ra-D, -E, -F und Radioblei. Die Bestandteile des langsam zerfallenden aktiven Niederschlages waren bereits bekannt, ehe Rutherford die Analyse des Niederschlages durchführte. Da Ra-D, -E und -F fortwährend aus dem Radium bezw. der Emanation entstehen, so muß in einem abgeschlossenen Radiumpräparat die Menge dieser Stoffe so lange zunehmen, bis das radioaktive Gleichgewicht erreicht ist. Es ist daher zu erwarten, daß alle Radium führenden Mineralien Fundstellen für die Bestandteile des aktiven Niederschlages bilden. In der Tat haben sich einige der neuen in radioaktiven Mineralien aufgefundenen Stoffe als identisch mit den Umwandlungsprodukten erwiesen. So ist das von Mme. Curie aus der Pechblende gewonnene Polonium identisch mit Ra-F und dem von Marckwald dargestellten Radiotellurium. Die aktiven Bestandteile des von Hofmann aus Pechblende gewonnenen Radiobleis bestehen aus Ra-D, -E und -F. Als Hilfsmittel für den Nachweis der Identität zweier aktiver Stoffe haben hierbei in erster Linie die Halbwertszeiten des Zerfalls und die von den Stoffen ausgesandten Strahlen gedient.

γ) Entstehung des Ra-D aus Ra-C; Ra-C_1 und Ra-C_2. In der vorstehenden Besprechung ist ein Beweis dafür, daß Ra-D aus Ra-C und nicht etwa direkt aus der Emanation ensteht, nicht erbracht worden. Dieser Beweis ist von Fajans (Phys. Z. 1911) in folgender Weise geführt worden. Stellt man einem mit Ra-C bedeckten Nickelbleche eine negativ geladene Metallplatte in geringem Abstande gegenüber, so sammelt sich auf dieser das Zerfallsprodukt des Ra-C infolge des Rückstoßes (vgl. Abschnitt 3d), welchen das Restatom bei der Aussendung der α-Partikeln erfährt, an. Eine längere Zeit so behandelte Platte ist anfangs fast inaktiv, gewinnt aber im Laufe der Zeit eine α- und β-Strahlenaktivität mit einer Geschwindigkeit, wie sie unter der Annahme zu erwarten ist, daß auf der Platte Ra-D sich befindet, aus welchem Ra-E und Ra-F entstehen. Es entsteht demnach das Ra-D direkt aus Ra-C.

Bei allen bisher behandelten Zerfallsprozessen hatten wir, ohne zu einem Widerspruch mit der Beobachtung zu gelangen, annehmen können, daß aus je einem Atom des zerfallenden Stoffes nur ein Atom des Zerfallsproduktes entsteht. Die Versuche über die Rückstoßaktivierung durch Ra-C führen jedoch zu der Annahme, daß aus dem Zerfall von Ra-C außer dem Ra-D noch ein zweites Umwandlungsprodukt entsteht. Dieses, von Hahn und Meitner zuerst aufgefundene Umwandelungsprodukt hat den Namen Ra-C_2 erhalten, während der durch die Halbwertszeit von 19,5 Minuten charakterisierte Stoff Ra-C_1 genannt wird. Ra-C_2 sendet nur β- (und γ-) Strahlen aus, und zwar in sehr viel geringerem Betrage als Ra-C_1, die Halbwertszeit des Ra-C_2 beträgt 1,38 Minuten. Der schnelle Zerfall des Ra-C_2 bewirkt, daß es sich mit dem Ra-C_1 unter gewöhnlichen Umständen stets im Gleichgewicht befindet, so daß bei unseren früheren Auseinandersetzungen über die Analyse des schnell zerfallenden aktiven Niederschlages das Ra-C_2 unberücksichtigt gelassen werden konnte. Da nach den Versuchen von Fajans die Rückstoßaktivierung Ra-C_2 in sehr viel geringerer Menge liefert als Ra-D, so kann Ra-D nicht das Zerfallsprodukt des Ra-C_2 sein. Zur Erklärung ist daher die Annahme zu machen, daß das Ra-C_1 gleichzeitig nach zwei Richtungen sich zersetzt, daß also eine Spaltung der Zerfallsreihe eintritt.

Die bisher besprochenen Ergebnisse der Untersuchung der Radiumfamilie sind in der folgenden Uebersicht zusammengefaßt.

Stoff	Halbwertszeit	Strahlen	Reichweite der α-Strahlen in Luft in cm	Verschiedene Eigenschaften
Radium	—	α, weiche β	3,3	Erdalkalimetall. Atomgew. = 225,95
Emanation	3,85 Tage	α	4,1?	Inertes Gas
Ra—A	3,0 Minuten	α	4,75	Flüchtig bei 800—900°
Ra—B	26,7 Minuten	weiche β, γ	—	Flüchtig bei 600—700°
Ra—C { Ra—C_1	19,5 Minuten	α, β, γ	7,0	Flüchtig bei 800—1300°
Ra—C { Ra—C_2	1,38 Minuten	β, (γ)	—	—
Ra—D	16,5 Jahre	weiche β	—	Flüchtig unterhalb von 1000°
Ra—E	5,0 Tage	β, γ	—	—
Ra—F	136 Tage	α	3,77	Flüchtig bei 1000°

6. Chemische und physikalische Eigenschaften der Radiumemanation. Die gasförmige Natur der Radiumemanation, ihre relativ große Beständigkeit und die Leichtigkeit, mit der sie aus starken Radiumpräparaten in beträchtlicher Menge gewonnen werden kann, haben der Radiumemanation eine besondere Stellung unter den Radioelementen verschafft. Mit ihr haben sich eine Reihe von Untersuchungen machen lassen, die mit anderen radioaktiven Stoffen nur schwer oder gar nicht auszuführen sind.

6a) Chemisches Verhalten der Emanation. Es ist bisher nicht gelungen, die Radiumemanation irgendwie chemisch zu beeinflussen. Sie wird auch bei den höchsten erreichten Temperaturen weder durch Oxydations- noch durch Reduktionsmittel verändert (Rutherford, Soddy, Ramsay). Das gleiche Verhalten zeigt die Thoriumemanation. Man rechnet daher die Emanationen den Edelgasen zu, und nimmt auf Grund dieser Analogie an, daß die Moleküle der Emanationen einatomig sind.

6b) Kondensation, Spektrum, Volumen und Molekulargewicht der Emanation. Wie die gewöhnlichen Gase, besitzen die radioaktiven Emanationen die Eigenschaft, daß sie sich bei tiefen Temperaturen kondensieren lassen. Leitet man durch ein U-Rohr, welches mit einem fluoreszierenden Stoff, z. B. Kristallen von Bariumplatincyanür, gefüllt ist und in flüssige Luft eintaucht, ein Gemisch von Radiumemanation und Luft langsam hindurch, so kann man die Kondensation der Emanation leicht beobachten (Rutherford und Soddy). Unter dem Einfluß der Emanation beginnen die Kristalle zu leuchten; das Leuchten verteilt sich jedoch nicht über die ganze Röhre, sondern bleibt auf diejenigen Kristalle beschränkt, die sich auf der Eintrittsseite des Gasstromes direkt unter der Oberfläche der flüssigen Luft befinden. Die Emanation ist also offenbar bei der Temperatur der

flüssigen Luft nicht mehr gasförmig, sondern flüssig oder fest. Entfernt man die flüssige Luft, so verflüchtigt sich die Emanation sehr schnell, sobald die Temperatur auf — 150° gestiegen ist, so daß plötzlich die ganze Schicht von Bariumplatincyanür zu leuchten beginnt. Die Verflüchtigungstemperatur der Radiumemanation ist zuerst von Rutherford und Soddy (1903) mit Hilfe der elektrischen Meßmethode bestimmt worden. Kondensiert man kleine Mengen der Emanation in einer Kupferspirale und leitet durch diese unter langsamem Erwärmen einen Luftstrom, so beobachtet man, daß bei — 150° plötzlich die gesamte Emanation sich verflüchtigt und durch den Luftstrom fortgeführt wird.

Die in neuerer Zeit zur Verfügung stehenden größeren Radiummengen haben es erlaubt, die Versuche über die Verdampfung der Emanation mit sichtbaren Mengen flüssiger Emanation auszuführen und zugleich die physikalischen Eigenschaften der gasförmigen Emanation zu untersuchen. Ein hierzu von Rutherford (Phil. Mag. 1908) benutzter Apparat ist in Figur 21 dargestellt.

Die Gase, bestehend aus Emanation, Wasser, Knallgas und Kohlensäure, die sich über einer starken Radiumlösung angesammelt haben, werden in den Behälter C übergeführt, dort zur Explosion gebracht und in dem mit Kali beschickten Behälter D von Wasser und Kohlensäure befreit. Hierauf wird das U-Rohr T in ein Kältebad getaucht, um die Emanation in T zu kondensieren, und mittels des Hahnes B der ganze Apparat

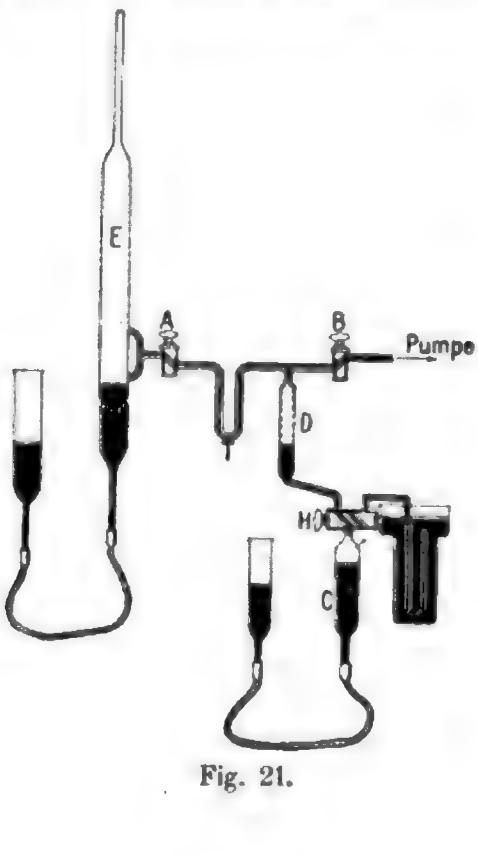


Fig. 21.

evakuiert. Die sodann wieder verflüchtigte Emanation wird durch den Hahn A in den Behälter E übergeführt und in den kapillaren Teil von E gedrückt, wo ihr Volumen und ihr Druck gemessen, und ihr Spektrum untersucht werden kann.

Durch Versuche dieser Art, die zuerst von Ramsay und Soddy ausgeführt wurden, ist gezeigt worden, daß die gasförmige Emanation dem Boyle-Mariotteschen Gesetze gehorcht und ein charakteristisches Spektrum besitzt. Eine Tabelle der Spektrallinien der Radiumemanation findet sich bei Mme. Curie, Die Radioaktivität, Bd. 1, S. 321. Die Dampfdruckkurve der flüssigen Radiumemanation ist von Rutherford und Ramsay und Gray bestimmt. Die Siedetemperatur bei Atmosphärendruck beträgt nach Rutherford — 65°, nach Ramsay und Gray — 62°; nach den Angaben der letzteren Autoren liegt der Schmelzpunkt der Radiumemanation bei — 71°, ihr kritischer Punkt bei 104,5°. Die flüssige Emanation ist farblos und durchsichtig und leuchtet selbst wahrscheinlich nicht: die feste Emanation leuchtet dagegen mit glänzendem Licht.

Um die Radiummenge' zu ermitteln, welche mit dem gemessenen Volumen der Emanation im Gleichgewicht stehen würde, hat Rutherford die von der Emanation bezw. dem mit ihr im Gleichgewicht stehenden aktiven Niederschlag ausgehende γ-Strahlung mit der γ-Strahlung eines Radiumpräparates von bekanntem Radiumgehalt verglichen, in welchem Gleichgewicht zwischen dem Radium und seinen schnell zerfallenden Produkten herrschte. Nach Abschnitt 5d hängt die Intensität der γ-Strahlung nur von der Menge des vorhandenen Ra-C ab, und im Gleichgewichtszustand ist die Menge des vorhandenen Ra-C sowohl der Menge der Emanation wie der des Radiums proportional. Die Intensität der γ-Strahlung bildet also ein Maß der Radiummenge, mit der die Emanationsmenge im Gleichgewichte stehen würde.

Das Volumen der Emanationsmenge, die mit 1 g Radium im Gleichgewicht steht, beträgt nach den Versuchen von Rutherford bei Normalbedingungen des Druckes und der Temperatur 0,6 mm³. Dieser Wert ist durch spätere Versuche von Debierne und Ramsay und Gray bestätigt worden und befindet sich in ausgezeichneter Uebereinstimmung mit dem auf Grund der Zerfallstheorie berechneten Werte (vgl. Abschnitt 8d). Die Emanationsmenge, die mit 1 g Radium im Gleichgewichte steht, wird ein „Curie" genannt.

Das Molekulargewicht der Emanation

ist von Ramsay und Gray durch Wägung einer Emanationsmenge von bekanntem Volumen mit Hilfe einer Mikrowage von etwa 1 Millionstel mg Empfindlichkeit bestimmt worden. Das gefundene Molekulargewicht beträgt 218. Nach einem Verfahren, das eine Modifikation der Bunsenschen Gasdichtebestimmung aus Ausströmungsgeschwindigkeiten darstellt, hat Debierne in befriedigender Uebereinstimmung mit den Resultaten von Ramsay und Gray für das Molekulargewicht den Wert 220 erhalten. Nimmt man an, daß die Emanation als Edelgas einatomig ist (vgl. Abschnitt 6a), so ist ihr Molekulargewicht zugleich ihr Atomgewicht. Nach der Zerfallstheorie sollte das Atomgewicht der Emanation unter der Voraussetzung, daß ein Radiumatom, Atomgewicht = 225,95, unter Aussendung einer α-Partikel, Atomgewicht = 4, in ein Atom der Emanation übergeht, 221,95 betragen. Die experimentell ermittelten Werte des Molekulargewichtes der Emanation stehen also mit der von der Theorie geforderten Zahl im Einklang.

Wie andere Gase wird die Emanation von Flüssigkeiten absorbiert. Die Absorption der Emanation ist in verschiedenen Flüssigkeiten verschieden groß, sie gehorcht jedoch stets dem Henryschen Gesetz (Boyle, Phil. Mag. 1911).

Nach den im vorstehenden mitgeteilten Untersuchungen ist die Radiumemanation ein chemisches Element, welchem in dem periodischen System der Elemente ein Platz in der Gruppe der Edelgase zukommt. Nur ihr Strahlungsvermögen zeichnet sie vor den leichteren Edelgasen aus. Die atomistische Natur der übrigen Zerfallsprodukte des Radiums ist nicht mit gleicher Sicherheit erwiesen. Im allgemeinen wissen wir von ihnen nur, daß sie ein charakteristisches chemisches und elektrochemisches Verhalten zeigen, und daß ihre Verdampfung bei verschiedenen Temperaturen stattfindet. Von diesen Eigenschaften ist bei der Analyse des aktiven Niederschlages Gebrauch gemacht worden. Das wohldefinierte chemische Verhalten des Ra-D und Ra-F hat es ermöglicht, die geringen Mengen dieser Stoffe, die sich in der Pechblende finden, auf chemischem Wege zu konzentrieren.

Eine Atomgewichtsbestimmung ist bisher für keines dieser Umwandlungsprodukte ausgeführt, jedoch ist Mme. Curie und Debierne der Nachweis gelungen, daß das Ra-F, Polonium, ein charakteristisches Spektrum besitzt.

7. Erzeugung von Helium und Wärmeentwickelung radioaktiver Stoffe. 7a) Entstehung von Helium aus radioaktiven Stoffen. Die Zerfallsprodukte des Radiums, die wir bisher kennen gelernt haben, sind selbst wieder aktiv und waren vor der Entdeckung der Radioaktivität nicht bekannt. Die im folgenden zu besprechenden Untersuchungen haben den Nachweis erbracht, daß aus dem Radium und anderen radioaktiven Stoffen ein wohl bekanntes inaktives chemisches Element, das Helium, immerwährend neu entsteht. Wir sehen bei diesen Versuchen, die Entstehung eines gewöhnlichen Elementes vor unseren Augen sich abspielen. Diese Versuche bieten daher eine der besten Stützen für die Auffassung, daß der Strahlungsprozeß mit einer Zerstörung des Atomverbandes Hand in Hand geht.

Nach der Zerfallstheorie ist zu erwarten, daß inaktive Produkte des radioaktiven Zerfallsprozesses in den radioaktiven Substanzen sich anhäufen. Größere Mengen dieser Zerfallsprodukte sollten sich daher in radioaktiven Mineralien finden lassen. Prüft man die Bestandteile der radioaktiven Mineralien von diesem Gesichtspunkte aus, so fällt vor allem auf, daß ein Edelgas, das Helium, ein steter Begleiter des Urans und Thoriums in den Mineralien ist. Das Helium scheint daher eines der inaktiven Zerfallsprodukte des Urans oder Thoriums zu sein, eine Vermutung, die von Rutherford und Soddy bereits bei der Aufstellung der Zerfallstheorie ausgesprochen wurde. Diese Vermutung wurde bald von Rutherford auf Grund seiner Versuche über die Ablenkung der α-Strahlen im elektrischen und magnetischen Felde (vgl. Abschnitt 3b) durch die Annahme ergänzt, daß die α-Partikeln nichts anderes sind als elektrisch geladene Heliumatome. Hiernach würde jeder α-Strahlen aussendende radioaktive Stoff imstande sein, im Laufe der Zeit Helium zu erzeugen.

Der Beweis, daß ältere Radiumpräparate Helium enthalten, ist zuerst durch Versuche von Ramsay und Soddy erbracht worden. Bei diesen Versuchen wurde ein stark aktives Radiumpräparat in Wasser gelöst, und das bei der Lösung entwickelte Gasgemisch aufgefangen. Nach der Reinigung des Gemisches blieb ein kleiner Gasrest zurück, der das vollständige Spektrum des Heliums zeigte. Einen weiteren Fortschritt brachte ein Versuch, bei welchem eine größere Menge der Radiumemanation in eine Spektralröhre eingeführt wurde. Das Spektrum der Emanation zeigte zunächst keine Heliumlinie, nach 3 Tagen trat jedoch die D_3-Linie des Heliums auf und nach 5 Tagen war das ganze Spektrum des Heliums sichtbar. Bei diesem Versuch konnte also das allmähliche Entstehen des Heliums aus der Emanation verfolgt werden.

Die Versuche von Ramsay und Soddy über die Erzeugung von Helium durch Ra-

dium sind durch Himstedt und Meyer, Curie und Dewar u. a. bestätigt worden. Der Nachweis der Heliumentwickelung ist für das Aktinium von Debierne, für das Polonium von Mme. Curie und Debierne sowie von Rutherford und Boltwood, für das Jonium von Boltwood, für Uran und Thorium von Soddy geführt worden. Das einzige bekannte Zerfallsprodukt, das allen diesen Stoffen gemeinsam ist, ist die α-Partikel. Diese Beobachtungen stimmen also mit der Annahme überein, daß die α-Partikeln geladene Heliumatome sind.

Den direkten Nachweis, daß die α-Partikeln mit Heliumatomen identisch sind, haben Rutherford und Royds geführt. Bei diesen Versuchen wurde in einem ursprünglich heliumfreien Raume Helium spektroskopisch nachgewiesen, nachdem durch ein sehr dünnwandiges, für α-Strahlen passierbares, aber für Gase undurchlässiges Glasrohr α-Strahlen in den Raum eingetreten waren.

Exakte Messungen der Geschwindigkeit, mit der Helium aus Radium entsteht, sind von Dewar, und Boltwood und Rutherford (Phil. Mag. 1911) ausgeführt worden. Die erhaltenen Resultate weichen nur unerheblich voneinander ab. Nach den Messungen von Boltwood und Rutherford beträgt die Heliummenge, welche von einem Gramm Radium im Gleichgewichte mit seinen ersten Umwandlungsprodukten (Emanation, Ra-A, Ra-B und Ra-C) in einem Jahre erzeugt wird, 156 mm^3 bei Normalbedingungen des Druckes und der Temperatur. Dieses Resultat befindet sich in ausgezeichneter Uebereinstimmung mit dem weiter unten aus der Zerfallstheorie abgeleiteten Werte.

Die Geschwindigkeit, mit der Helium aus der Emanation und dem aktiven Niederschlag allein entsteht, sollte $^3/_4$ der Geschwindigkeit betragen, mit der Helium von dem Radium im Gleichgewicht mit seinen schnell zerfallenden Umwandlungsprodukten gebildet wird. Während nämlich von dem Radium im Gleichgewichte mit seinen schnell zerfallenden Umwandlungsprodukten 4 Arten von α-Strahlen ausgesandt werden, treten bei dem Zerfall der Emanation und des schnell zerfallenden aktiven Niederschlages nur 3 α-Strahlenumwandlungen auf. Die von Boltwood und Rutherford gemessene Geschwindigkeit der Heliumbildung aus der Emanation ist um 10 % niedriger als der unter der obigen Voraussetzung berechnete Wert. Die Versuche mit der Emanation bieten jedoch erheblich größere experimentelle Schwierigkeiten, als die mit dem Radium; der Abweichung des beobachteten von dem berechneten Werte darf daher kein zu großes Gewicht beigelegt werden.

7b) **Wärmeentwickelung durch radioaktive Stoffe.** Radiumsalze besitzen die Fähigkeit, spontan und kontinuierlich Wärme zu entwickeln, wie zuerst von Curie und Laborde 1903 beobachtet wurde. Die Wärmemenge, welche von 1 g Radium pro Stunde entwickelt wird, beträgt nach der neuesten Untersuchung von Schweidler und Heß 118 Grammkalorien. Die entwickelte Wärme rührt nicht allein von dem Radium her, sondern verteilt sich nach den Versuchen von Rutherford und Barnes in der Weise auf die Umwandlungsprodukte des Radiums, daß zu der gesamten von dem Radium im Gleichgewicht mit seinen schnell zerfallenden Umwandlungsprodukten abgegebenen Wärmemenge, das Radium selbst etwa 25 %, die Emanation im Verein mit Ra-A 44 %, und Ra-C 31 % beisteuern. Die Wärmeabgabe eines nicht im Gleichgewichte befindlichen Radiumpräparates ändert sich nach Maßgabe seines Gehaltes an Emanation und aktivem Niederschlag, und die von der Emanation und dem aktiven Niederschlag abgegebene Wärme nimmt nach genau demselben Exponentialgesetz ab, wie die Strahlungsintensität der Emanation, d. h. sie fällt in etwa 3,8 Tagen auf den halben Wert. Daß Thorium und Polonium gleichfalls Wärme entwickeln, ist von Pegram und Webb, sowie Duane gezeigt worden

Die spontane Wärmeentwickelung radioaktiver Substanzen rührt, wie aus den Versuchen von Rutherford und Barnes hervorgeht und von anderen Forschern bestätigt ist, zum weitaus überwiegenden Teile von den α-Strahlen her und nur zu einem geringen Bruchteile von den β- und γ-Strahlen, sowie den Rückstoßatomen. Sie findet ihre Erklärung darin, daß bei der Absorption der α-Strahlen in dem radioaktiven Präparate selbst oder den Wänden des Kalorimetergefäßes die hohe kinetische Energie der α-Partikeln sich in Wärme umwandelt.

Aus den mitgeteilten Zahlen ergibt sich, daß ein Curie der Emanation im Gleichgewicht mit dem schnell zerfallenden aktiven Niederschlag etwa 75 Grammkalorien pro Stunde entwickelt. Hieraus und aus der Halbwertszeit der Emanation läßt sich leicht berechnen, daß die gesamte von 1 ccm der Emanation entwickelte Wärmemenge etwa 10 Millionen Grammkalorien beträgt. Bei der Verbrennung von 1 ccm Wasserstoff werden etwa 3 Grammkalorien frei. Die Wärmeentwickelung bei der Umwandlung der Emanation ist also mehrere Millionen mal größer als die Wärmeentwickelung bei der Knallgasexplosion.

8. Zahl der α-Partikeln. Die in den beiden vorstehenden Abschnitten besproche-

nen Messungen des Volumens der Emanation, der Bildungsgeschwindigkeit des Heliums und der Wärmeentwickelung erlauben, die Zahl der von 1 g Radium ausgesandten α-Partikeln zu berechnen, wenn gewisse Annahmen über die Ladung der α-Partikeln und die Zahl der von einem Radiumatom ausgesandten α-Partikeln und gebildeten Emanationsatome gemacht werden. Im Folgenden werden wir jedoch zwei Methoden kennen lernen, welche die von einem radioaktiven Stoffe ausgesandten α-Partikeln direkt zu zählen erlauben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden wir dazu benutzen, das Volumen der Emanation, die Bildungsgeschwindigkeit des Heliums und die Wärmeentwickelung zu berechnen, und so zu einem Vergleich der berechneten Werte mit den beobachteten gelangen.

8a) Elektrische Zählmethode. Nach einer von Rutherford ausgeführten Schätzung der Zahl der von 1 g Radium in der Sekunde ausgesandten α-Partikeln beträgt die Gesamtzahl der von einer α-Partikel des Radiums in Luft erzeugten Ionen rund 150 000. Diese Schätzung beruht auf der Messung der Gesamtladung der von einer dünnen Radiumschicht ausgesandten α-Partikeln, der Messung des Sättigungsstromes, den das Präparat in Luft erzeugt, und der Annahme, daß jede α-Partikel eine doppelte Ionenladung, 2 e, besitzt. Mit einem sehr empfindlichen Elektroskop oder Elektrometer sollte es möglich sein, eine Elektrizitätsmenge von 150 000 e zu messen. Wegen der Kleinheit der Elektrizitätsmenge ist die Ausführung der Messung jedoch mit Schwierigkeiten verbunden. Rutherford und Geiger haben sich daher einer Methode bedient, bei welcher der elektrische Effekt einer einzelnen α-Partikel sich automatisch vergrößert. Bei dieser Methode werden die von einer α-Partikel erzeugten Ionen zur Erzeugung neuer Ionen durch „Stoßionisation" verwandt (Townsend, Phil. Mag. 1901 und 1903, vgl. auch den Artikel „Elektrizitätsleitung in Gasen"). Läßt man eine α-Partikel in ein Ionisationsgefäß eintreten, in welchem die Bedingungen des Eintritts der Stoßionisation, nämlich niedriger Gasdruck und starkes elektrisches Feld, erfüllt sind, so läßt sich die von einer einzelnen α-Partikel hervorgerufene Ionisation leicht mehrere Tausend mal vergrößern. Der Stromstoß, welcher bei dem Eintritt einer α-Partikel in das Ionisationsgefäß auftritt, wird auf diese Weise hinreichend vergrößert, um leicht elektrometrisch meßbar zu sein, und die in einer bestimmten Zeit in das Gefäß eintretenden α-Partikeln sind aus der Zahl der Stromstöße leicht zu bestimmen. Als Strahlungsquelle haben Rutherford und Geiger Ra-C benutzt, welches den Vorteil besitzt, leicht in dünner Schicht sich herstellen zu lassen, so daß die Strahlen gleichmäßig nach allen Richtungen ausgesandt werden.

Nach den Versuchen von Rutherford und Geiger sendet diejenige Menge von Ra-C, die sich im Gleichgewichte mit 1 g Radium befindet, $3{,}4 . 10^{10}$ α-Partikeln in der Sekunde aus. Die oben erwähnten Versuche von Bragg haben gezeigt, daß im Gleichgewichtszustande von dem Radium und jedem seiner α-Strahlenprodukte in der Sekunde die gleiche Zahl von α-Partikeln ausgesandt wird. Die Gesamtzahl der von 1 g Radium im Gleichgewichte mit seinen drei schnell zerfallenden α-Strahlenprodukten ausgesandten α-Partikeln beträgt daher $13{,}6 . 10^{10}$ pro sec.

8b) Optische Zählmethode. Die Fluoreszenzwirkung der α-Strahlen besteht, wie im Abschnitt 2b erwähnt wurde, nicht in einer Aufhellung des ganzen Fluoreszenzschirmes, sondern darin, daß einzelne Punkte des Schirmes zu hellem Aufleuchten gebracht werden. Diese Szintillationen sind von Regener und Rutherford und Geiger mit Hilfe des Mikroskops unter Verwendung geeigneter Schirme aus Zinksulfid und Diamant gezählt worden. Rutherford und Geiger haben gefunden, daß die Zahl der von den α-Partikeln des Ra-C hervorgebrachten Szintillationen innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler gleich der Zahl der α-Partikeln ist, die sich nach der elektrischen Zählmethode ergibt. Hieraus folgt, daß jede α-Partikel eine Szintillation hervorruft.

Auf einem indirekten Wege ist Regener zu demselben Resultat gekommen (Verh. d. D. phys. Ges. 1908, Akad. d. Wiss. Berlin 1909).

Aus der Zahl der von einem radioaktiven Präparate ausgesandten α-Partikeln und der gesamten von den α-Partikeln transportierten Ladung (vgl. Abschnitt 3b) ergibt sich die Ladung einer einzelnen α-Partikel. Diese beträgt nach den mit Ra-C ausgeführten Versuchen von Rutherford und Geiger $9{,}3 . 10^{-10}$, nach den mit Polonium ausgeführten Versuchen von Regener $9{,}58 . 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten. Die Hälften dieser Werte 4,65 bezw. $4{,}79 . 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten befinden sich in guter Uebereinstimmung mit neueren Bestimmungen des elektrischen Elementarquantums. Es ist daher durch diese Versuche bewiesen, daß die α-Partikel eine Ladung von zwei elektrischen Elementarquanten besitzt.

Hieraus und aus dem Werte, den das Verhältnis $\frac{e}{m}$ der Ladung zur Masse der α-Partikel nach den Versuchen über die

Ablenkung der α-Strahlen im elektrischen und magnetischen Felde besitzt, läßt sich die Masse der α-Partikel berechnen. Es ergibt sich auf diesem Wege unabhängig von den spektroskopischen Versuchen (vgl. Abschnitt 7a) der Nachweis, daß die α-Partikeln geladene Heliumatome sind.

Wie bei Ra-C und Polonium läßt sich auch bei anderen radioaktiven Stoffen, z. B. dem Uran, Thorium, den Emanationen usw. eine Zählung der α-Partikeln ausführen, und zur Untersuchung der Eigenschaften des betreffenden Stoffes verwenden. Aus der zeitlichen Abnahme der Zahl der von einem radioaktiven Stoffe ausgesandten α-Partikeln kann man z. B. seine Halbwertszeit ermitteln. Durch Szintillationsbeobachtungen hat H. Geiger die Zerstreuung bestimmen können, welche ein Bündel von α-Strahlen bei seinem Durchgange durch Metallfolien erfährt.

Die Zahl der α-Teilchen, die von einem radioaktiven Präparate in der Zeiteinheit ausgesandt werden, ist nicht konstant, sondern unterliegt, worauf v. Schweidler zuerst hingewiesen hat, zeitlichen Schwankungen, die von den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie beherrscht werden. Näheres hierüber s. Edg. Meyer, Jahrb. d. Rad. u. Elektr. 1908; 1909.

8c) Die in dem Vorstehenden mitgeteilten Beobachtungen erlauben, eine Reihe wichtiger radioaktiver Größen zu berechnen.

α) Volumen der Radiumemanation. Unter der Voraussetzung, daß ein Radiumatom bei seinem Zerfall nur eine α-Partikel aussendet, und nur ein Atom der Emanation erzeugt, ist die Zahl n der in 1 g Radium in der Sekunde zerfallenden Radiumatome und entstehenden Emanationsatome gleich der Zahl der von dem Radium ausgesandten α-Partikeln, d. h. es ist $n = 3{,}4 . 10^{10}$. Diese Zahl ist nach Gleichung (5) mit der radioaktiven Konstanten λ_1 der Emanation und der Zahl N_1 der im Gleichgewichte vorhandenen Atome der Emanation durch die Beziehung $n = N_1 . \lambda_1$ verbunden. Aus den Werten von $\lambda_1 = 2{,}084 . 10^{-6}$ (sec^{-1}) und von n berechnet sich N_1 zu $1{,}632 . 10^{16}$. Die Zahl der in 1 ccm eines Gases bei Normalbedingungen des Druckes und der Temperatur enthaltenen Moleküle ergibt sich aus der Aequivalentladung eines elektrolytischen Ions und dem von Rutherford und Geiger ermittelten Werte der Elementarladung zu $N_0 = 2{,}72 . 10^{19}$. Das Volumen der im Gleichgewichte mit 1 g Radium befindlichen Emanationsmenge beträgt daher wenn die Emanation ein einatomiges Gas ist:

$$V = \frac{N_1}{N_0} = 0{,}6 \text{ cmm.}$$

β) Geschwindigkeit der Bildung des Heliums aus Radium. Die Zahl der von 1 g Radium im Gleichgewichtszustande in der Sekunde ausgesandten α-Partikeln ist nach Abschnitt 8a gleich $13{,}6 . 10^{10}$. Das Volumen des Heliums, welches von 1 g Radium im Gleichgewichtszustande gebildet wird, beträgt daher $5{,}0 . 10^{-9}$ ccm pro sec oder 158 cmm pro Jahr.

γ) Wärmeentwickelung des Radiums. Aus der elektrischen Ablenkung der vier Arten der vom Radium ausgesandten α-Strahlen hat Rutherford berechnet, daß die kinetische Energie der von 1 g Radium im Gleichgewichte ausgesandten α-Strahlen $4{,}15 . n . 2e . 10^6$ erg beträgt. Hieraus berechnet sich die Wärmemenge, welche durch die α-Partikeln von 1 g Radium im Gleichgewichtszustande erzeugt wird, zu 113 g cal pro Stunde.

δ) Halbwertszeit des Radiums. Nach der Gleichung (5) ist die Anzahl N_2 der in 1 g Radium enthaltenen Atome mit der Zahl n der in der Sekunde zerfallenden Atome durch die Beziehung $n = \lambda_2 N_2$ verknüpft, wenn λ_2 die radioaktive Konstante des Radiums bedeutet. Nach dem Faradayschen Gesetz ist $N_2 . e . 225{,}95 = 2{,}894 . 10^{14}$ elstat. E.; demnach ist $N_2 = 2{,}75 . 10^{21}$ und die Halbwertszeit des Radiums beträgt 1780 Jahre.

8d) Vergleich der berechneten Werte mit den beobachteten. In der folgenden Tabelle sind die eben berechneten Werte mit den beobachteten zusammengestellt.

Die Uebereinstimmung, welche hiernach zwischen den Beobachtungsresultaten und den berechneten Werten des Molekulargewichtes der Emanation, ihres Volumens und der Heliumbildung besteht, liefert eine ausgezeichnete Bestätigung für die Richtigkeit der den Berechnungen zugrunde gelegten Annahmen. Die mitgeteilten Beobachtungsdaten der Wärmeentwickelung des Radiums umfassen die gesamte von dem Radium unter den Versuchsbedingungen abgegebene Wärme, d. h. außer der Wärmeentwickelung durch die α-Strahlen, noch die durch die Rückstoßatome und einen Teil der durch die β- und γ-Strahlen hervorgerufenen Wärmeentwickelung. Die kinetische Energie eines Rückstoßatomes beträgt etwa 2 % derjenigen einer α-Partikel, und die Zunahme der Wärmeabgabe, welche eintritt, wenn die β-Strahlen vollständig in dem Kalorimeter absorbiert werden, beträgt nach den Beobachtungen verschiedener Forscher etwa 5 % des Gesamtwertes. Die auf der Absorption der α-Strahlen beruhende Wärmeentwickelung muß also etwa um 7 % kleiner sein, als die gesamte Wärme-

	ber.	beob.	Beobachter
Molekulargewicht der Emanation	221,95	218 220	Ramsay u. Gray Debierne
Volumen der Emanation im Gleichgewichte mit 1 g Ra	0,60 cmm	0,61 cmm 0,58 cmm 0,60 cmm	Rutherford Debierne Ramsay u. Gray
Geschwindigkeit der Heliumentwickelung aus 1 g Ra im Gleichgewicht	158 cmm pro Jahr	164 cmm pro Jahr 156 cmm pro Jahr	Dewar Boltwood und Rutherford
Wärmeentwickelung der α-Strahlen von 1 g Ra im Gleichgewicht	113 gr cal. pro Std.	<117 gr cal. pro Std. <118 gr cal. pro Std.	Ångström Schweidler und Heß
Halbwertszeit des Radiums	1780 Jahre	ca. 2000 Jahre[1])	Boltwood

[1]) Vgl. Abschnitt 9b.

entwickelung des Radiums, was mit der Beobachtung gut übereinstimmt.

9. Zusammenhang zwischen Uran und Radium. 9a) Entstehung des Radiums aus dem Uran. In dem vorausgehenden Kapitel ist berechnet worden, daß das Radium mit einer Halbwertszeit von 1780 Jahren zerfällt. Wenn die Erde zu irgendeiner Zeit aus reinem Radium bestanden hätte, so würde ihr Radiumgehalt 40 000 Jahre später infolge des Zerfalls des Radiums unter den Radiumgehalt gesunken sein, den etwa die Pechblende besitzt. Da ein Zeitraum von einigen Zehntausend Jahren im Verhältnis zu dem Alter der in der Erde enthaltenen Mineralien sehr klein ist, so kann der Radiumgehalt der Mineralien nur dadurch aufrecht erhalten werden, daß das Radium dauernd aus einem der in den radioaktiven Mineralien enthaltenen Elemente neu entsteht. In der Tat ist, wie wir sehen werden, das Radium ein Abkömmling des Urans.

Der Beweis hierfür ist zunächst auf indirektem Wege durch Boltwood, Strutt und Mc.Coy geführt. In einem alten radioaktiven Mineral muß, falls Uran und Radium in genetischer Beziehung zueinander stehen, zwischen dem Uran und dem Radium Gleichgewicht herrschen; d. h. es muß die Zahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Uranatome gleich der Zahl der in der Zeiteinheit zerfallenden Radiumatome sein. Die α-Strahlenaktivität eines alten radioaktiven Minerals muß sich daher aus seinem Urangehalt und aus dem Ionisierungsvermögen (Reichweite) der α-Partikeln des Urans und seiner Zerfallsprodukte berechnen lassen. Das Resultat dieser Berechnungen stimmt in ausgezeichneter Weise mit der Beobachtung überein.

Im Falle des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen Uran und Radium muß ferner Proportionalität zwischen dem Urangehalt und dem Radiumgehalt des Minerals herrschen. Boltwood und Strutt haben den Gehalt radioaktiver Mineralien an Uran und Radium verglichen, indem sie das Uran auf chemischem Wege, das Radium durch Messung der Emanationsmenge bestimmten, die bei der Auflösung des Minerals in Freiheit gesetzt wird (vgl. Abschnitt 5b). Nach diesen Versuchen, welche eine große Anzahl von Mineralien verschiedener Herkunft und verschiedensten Urangehaltes umfaßten, steht in Mineralien der Urangehalt in einem konstanten Verhältnis zu dem Radiumgehalt und zwar beträgt der Radiumgehalt $3{,}4 . 10^{-7}$ g Radium pro g Uran.

Von Soddy ist schließlich der direkte Nachweis erbracht, daß in einem ursprünglich radiumfreien, sehr sorgfältig gereinigten Uranpräparat im Laufe der Zeit Radium entsteht.

9b) Ionium; Halbwertszeit des Radiums. Die eben besprochenen Versuche lassen es als unzweifelhaft erscheinen, daß Radium ein Abkömmling des Urans ist; die Geschwindigkeit, mit der Radium in einer reinen Uranlösung entsteht, ist jedoch erheblich geringer, als sich unter der Annahme ergibt, daß sich das Uran bezw. Uran-X direkt in Radium umwandeln würde. Es muß daher zwischen Uran-X und Radium mindestens eine Zwischensubstanz von relativ großer Halbwertszeit existieren. Versuche, die von Rutherford und Boltwood zur Auffindung dieses Stoffes gemacht wurden, haben zu der Entdeckung des Ioniums geführt. Das Ionium ist in seinem chemischen Verhalten dem Thorium sehr ähnlich, es sendet α-Strahlen

von geringer Reichweite aus und besitzt die Eigenschaft, dauernd und mit großer Geschwindigkeit Radium zu erzeugen. Der Nachweis, daß Ionium aus Uran entsteht, ist noch nicht geführt worden. Nach einer von Geiger und Nuttall aufgestellten Beziehung zwischen Halbwertszeit und Reichweite (s. Abschnitt 12b) beträgt die Halbwertszeit des Ioniums 200 000 Jahre.

Aus dem Radiumgehalt eines Minerals und der Radiummenge, welche das aus dem Mineral abgeschiedene Ionium im Laufe eines Jahres erzeugt, hat Boltwood die Halbwertszeit des Radiums zu etwa 2000 Jahren bestimmt. Da bei dieser Bestimmung die nicht sicher gestellte Voraussetzung zu machen ist, daß das Ionium quantitativ aus dem Mineral entfernt wurde, so darf die Uebereinstimmung des von Boltwood erhaltenen Wertes der Halbwertszeit mit dem oben zu 1780 Jahren berechneten als befriedigend angesehen werden.

9c) Halbwertszeit des Urans. Aus der Halbwertszeit des Radiums läßt sich die des Urans leicht berechnen. Nach Gleichung (9) verhalten sich die Zahlen der im Gleichgewichtszustande vorhandenen Atome von Radium und Uran wie ihre Halbwertszeiten. Das Verhältnis der Gewichtsmengen des Radiums und Urans ist daher gleich $\frac{225,95}{238,5} \cdot \frac{T_{Ra}}{T_{Ur}}$, wenn T_{Ur} die Halbwertszeit des Urans und $T_{Ra} = 1780$ Jahre die Halbwertszeit des Radiums bedeutet. Andererseits hat dieses Verhältnis nach den oben erwähnten Messungen von Rutherford und Boltwood den Wert $3,4 . 10^{-7}$. Aus der Gleichsetzung beider Werte ergibt sich für die Halbwertszeit des Urans der Wert $5 . 10^{9}$ Jahre.

9d) Radiouran und Uran-Y. Die relativen Aktivitäten der verschiedenen in den Uranmineralien enthaltenen Stoffe sind von Boltwood bestimmt worden, indem die von sehr dünnen Schichten hervorgerufene Ionisation gemessen wurde. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Uran	1,00
Ionium	0,35
Radium	0,45
Em + Ra-A + Ra-B + Ra-C	2,10
Polonium	0,46
	4,36

Die Aktivität pro g Uran ist bei den Mineralien ungefähr 4,7 mal so groß wie bei den Uransalzen. Die Differenz von 0,3, welche zwischen dieser Zahl und der Summe der in der Tabelle enthaltenen Werte besteht, stellt wahrscheinlich den Anteil dar, den das in den Mineralien enthaltene Aktinium an der Gesamtaktivität der Mineralien besitzt.

Die Zahlen der Tabelle stehen im allgemeinen im Verhältnis der Reichweiten der α-Strahlen zueinander; jedoch ist die Aktivität des Urans etwa doppelt so groß, als zu erwarten wäre. Das Uran scheint also zweimal so viele α-Partikeln auszusenden wie das Radium. In der Tat ist kürzlich von Geiger und Nuttall (Phil. Mag. 1912) nachgewiesen worden, daß das Uran zwei Arten von α-Strahlen mit den Reichweiten 2,5 bezw. 2,9 cm aussendet. Da nach Szintillationsbeobachtungen von Marsden und Barratt (Proc. Phys. Soc. 1911) die Annahme ausgeschlossen ist, daß ein Uranatom bei seinem Zerfall gleichzeitig zwei α-Partikeln aussendet, so ist es sehr wahrscheinlich, daß das Uran noch ein weiteres radioaktives Element enthält, für welches der Name Radiouran vorgeschlagen ist. Eine chemische Trennung des Radiourans von dem Uran ist bisher nicht gelungen. Aus der Reichweite von 2,9 cm berechnet sich für das Radiouran eine Halbwertszeit von 2×10^{6} Jahren.

Ein weiteres Umwandlungsprodukt des Urans, das Uran-Y, ist von Antonoff (Phil. Mag. 1911) aufgefunden. Das Uran-Y ist in seinem chemischen Verhalten dem Uran-X sehr ähnlich, es besitzt eine Halbwertszeit von 1,5 Tagen und sendet neben einer weichen β-Strahlung vielleicht auch eine geringe α-Strahlung aus. Es wird von dem Uran nur in geringer Menge, verglichen mit der Menge des Uran-X, erzeugt und bildet wahrscheinlich ein Seitenprodukt der Hauptzerfallsreihe des Urans. Die Rolle, welche das Uran-Y bei den Vorgängen spielt, welche die Abscheidung des Uran-X aus dem Uran begleiten, ist sehr gering, so daß wir oben (vgl. Abschnitt 4b) auf das Uran-Y keine Rücksicht zu nehmen brauchten.

9e) Endprodukt der Umwandlungsreihe Uran-Radium. Nach dem Obigen werden bei der sukzessiven Umwandlung eines Uranatoms in ein Radiumatom drei α-Partikeln ausgesandt, nämlich je eine von dem Uran, dem Radiouran und dem Ionium. Das Atomgewicht des Radiums würde sich also zu $238,5 - 12 = 226,5$ berechnen, ein Wert, der ein wenig höher ist als das experimentell ermittelte Atomgewicht des Radiums, 225,95. Bei den Umwandlungen der Radiumfamilie werden 5 α-Partikeln ausgesandt; das Atomgewicht des Endproduktes der Radiumumwandlung sollte daher 205,95 betragen. Da das Atomgewicht 206,9 des Bleies diesem Werte sehr nahe kommt, so ist von Rutherford die Vermutung ausgesprochen worden, daß das Blei das Endprodukt der Umwandlung des

Radiums sei. Diese Annahme wird durch Versuche von Boltwood über den Bleigehalt radioaktiver Mineralien gestützt. Aus diesen Versuchen, die neuerdings von Holmes (Proc. Roy. Soc. 1911) bestätigt worden sind, geht hervor, daß das Verhältnis des Bleigehaltes zu dem Urangehalt bei Mineralien gleichen Alters nahezu konstant ist, bei Mineralien verschiedenen geologischen Alters aber mit dem Alter der Mineralien wächst. Das Endprodukt auf direktem Wege durch die chemische Untersuchung des Zerfallsproduktes von Ra-F zu finden, ist bisher nicht gelungen; die experimentellen Schwierigkeiten, die seiner Auffindung entgegenstehen, erscheinen jedoch keineswegs unüberwindlich.

10. Umwandlungsreihe des Aktiniums. Außer der Uran-Radiumfamilie sind uns zurzeit noch zwei Familien radioaktiver Stoffe bekannt, die des Aktiniums und des Thoriums. Die Methoden der radioaktiven Analyse, die zur Auffindung und Verknüpfung der einzelnen Glieder einer radioaktiven Zerfallsreihe führen, sind an den Beispielen des Urans und Radiums ausführlich behandelt worden. Bei der Besprechung der Aktinium- und Thoriumreihe werden wir uns daher auf die Mitteilung der wichtigsten Ergebnisse beschränken können.

10a) Aktinium, Radioaktinium, Aktinium-X. In den Uranmineralien findet sich neben dem Radium und Ionium noch ein weiterer radioaktiver Stoff von langer Lebensdauer, das von Debierne 1899 und unabhängig von ihm von Giesel 1902 aufgefundene Aktinium.

Seinem chemischen Verhalten nach ist das Aktinium der Gruppe der seltenen Erden zuzurechnen. Es ist bisher nicht gelungen, das Aktinium chemisch zu isolieren; sein Atomgewicht und sein Spektrum sind noch nicht bekannt. Da schon sehr stark aktive Aktiniumpräparate dargestellt sind, dürften reine Aktiniumsalze eine Aktivität von etwa derselben Größenordnung besitzen wie Salze des Radiums.

Die Strahlung der Aktiniumpräparate rührt praktisch allein von den Zerfallsprodukten des Aktiniums her, die Muttersubstanz der Aktiniumfamilie, das Aktinium selbst, ist völlig oder nahezu strahlenlos.

Nach Zusatz von Natriumthiosulfat zu einer sauren Aktiniumlösung fällt mit dem abgeschiedenen Schwefel ein stark aktiver Stoff, das Radioaktinium (Hahn 1906) aus. Das Radioaktinium sendet α-Strahlen und weiche β-Strahlen aus, seine Halbwertszeit beträgt 19,5 Tage. Mit der gleichen Halbwertszeit gewinnt das Aktinium seine Aktivität zurück, wodurch die Abstammung des Radioaktiniums von dem Aktinium erwiesen ist.

Beim Behandeln einer Aktiniumlösung mit Ammoniak wird das Radioaktinium zusammen mit dem Aktinium gefällt. Der nach dem Eindampfen des Filtrates verbleibende geringe Rückstand enthält einen stark aktiven Stoff, das Aktinium-X. Das Aktinium-X (Giesel 1904, Godlewski 1905) sendet nur α-Strahlen aus und besitzt eine Halbwertszeit von 10,5 Tagen; durch Hahn ist nachgewiesen worden, daß es von dem Radioaktinium regeneriert wird.

10b) Aktiniumemanation, aktiver Niederschlag des Aktiniums. Das Umwandlungsprodukt des Aktinium-X bildet, wie von Godlewski gezeigt ist, die bei gewöhnlicher Temperatur gasförmige Aktiniumemanation (Giesel 1902), das charakteristische Mittelglied der Aktiniumfamilie. Wie die Radiumemanation sendet die Aktiniumemanation α-Partikeln aus; sie zerfällt jedoch sehr viel schneller als jene, ihre Halbwertszeit beträgt nur 3,9 Sekunden. Bei Temperaturen zwischen — 120° und — 150° läßt sich die Aktiniumemanation verflüssigen.

Der aktive Niederschlag des Aktiniums, zu dessen Entstehung der Zerfall der Aktiniumemanation Anlaß gibt, läßt sich, wie der des Radiums, auf der negativen Elektrode eines elektrischen Feldes konzentrieren. Der aktive Niederschlag besteht aus vier Produkten, die mit Aktinium-A bis -D bezeichnet werden. Eine Uebersicht über die radioaktiven Eigenschaften dieser Produkte findet sich in der im Abschnitt 12b gegebenen Tabelle. Aktinium-A[1]), das direkte Umwandlungsprodukt der Aktiniumemanation, welches α-Strahlen aussendet, besitzt eine Halbwertszeit von 0,002 Sekunden (Geiger, Moseley und Fajans, Phil. Mag. 1912)[2]). Infolge seines schnellen Zerfalles ist das Aktinium-A unter gewöhnlichen Versuchsbedingungen stets mit der Aktiniumemanation im Gleichgewicht, so daß scheinbar ein Atom der Aktiniumemanation bei seinem Zerfall gleichzeitig zwei α-Partikeln aussendet (Bronson, Phil. Mag. 1908, Geiger und Marsden, Phys. Zeitschr. 1910). Aus dem gleichen Grunde enthält ein mit dem aktiven Niederschlag bedeckter Draht in der Regel nur die drei letzten Glieder des aktiven Niederschlages.

10c) Stellung des Aktiniums in der Umwandlungsreihe des Urans. Die Lebensdauer des Aktiniums ist, wie aus der hohen spezifischen Aktivität stark ak-

[1]) Die Nomenklatur ist die von Rutherford und Geiger (Phil. Mag. Okt. 1911 S. 621) vorgeschlagene.

[2]) Ebenda finden sich Mitteilungen über eine Versuchsmethode, welche die Untersuchung sehr kurzlebiger Stoffe gestattet.

tiver Aktiniumpräparate folgt, ungefähr ebenso groß wie die des Radiums. Das Aktinium muß daher wie das Radium fortwährend neu gebildet werden. Da das Aktinium sich stets in Uranmineralien findet, so liegt es nahe, in dem Uran auch die Ursprungssubstanz des Aktiniums zu vermuten. Der Beweis hierfür, z. B. der Nachweis, daß in den Uranmineralien ein konstantes Verhältnis zwischen ihrem Gehalt an Uran und an Aktinium besteht, ist jedoch bisher noch nicht geführt. Wenn Aktinium ein Glied in der Hauptumwandlungsreihe des Urans bildete, so sollte der Anteil, welchen das Aktinium zu der Aktivität des Minerals beiträgt, etwa ebenso groß sein, wie der des Radiums. Wie wir oben (Abschnitt 9d) gesehen haben, ist aber die Aktivität, die dem Aktinium zugeschrieben werden kann, nur ein geringer Bruchteil der Aktivität des Radiums. Wenn daher Aktinium aus dem Uran entsteht, so kann es nicht wie das Radium in gerader Linie von dem Uran abstammen. Von Rutherford ist deshalb die Vermutung ausgesprochen worden, daß das Aktinium zwar von dem Uran oder einem seiner Umwandlungsprodukte abstammt, aber in viel geringerer Menge gebildet wird als ein gleichzeitig entstehendes anderes Produkt. Die Aktiniumfamilie würde also einen Seitenzweig der Hauptzerfallsreihe des Urans bilden. Daß solche Seitenzweige existieren, ist oben bei der Besprechung des Uran-Y und des Ra-C_2 gezeigt worden. Ueber das Endprodukt der Aktiniumreihe ist bisher nichts bekannt.

11. Umwandlungsreihe des Thoriums. 11a) Thorium, Mesothorium, Radiothorium. Die Radioaktivität des Thoriums ist 1898 durch G. C. Schmidt und, unabhängig von ihm, durch Mme Curie entdeckt worden. Die spezifische Aktivität eines Thoriumpräparates in dünner Schicht ist von derselben Größenordnung wie die eines Uranpräparates. Hieraus ist zu schließen, daß die Halbwertszeit des Thoriums von derselben Größenordnung ist, wie die des Urans, d. h. ca. 10^{10} Jahre beträgt. Das Thorium selbst sendet α-Strahlen von geringer Reichweite aus.

Das erste bisher bekannte Zerfallsprodukt des Thoriums bildet das Mesothorium-1 Das Mesothorium-1 (Hahn 1907) ist seinem chemischen Verhalten nach dem Radium sehr ähnlich, es sendet wahrscheinlich keine oder nur schwach ionisierende Strahlen aus und wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 5,5 Jahren in das β- und γ-Strahlen aussendende Mesothorium-2 um. Das Mesothorium-2 (Hahn 1908) läßt sich aus einer nur Mesothorium-1 enthaltenden Lösung durch Fällung mit Ammoniak in Gegenwart von Zirkonchlorid isolieren. Es verliert seine β- und γ-Strahlenaktivität mit einer Halbwertszeit von 6,2 Stunden, während das Mesothorium-1 mit der gleichen Halbwertszeit wieder aktiv wird. Hierdurch ist der genetische Zusammenhang zwischen Mesothorium-1 und -2 erwiesen.

Nach Herstellung des Gleichgewichtes zwischen Mesothorium-1 und -2 nimmt die Gesamtaktivität des Mesothoriums mehrere Jahre lang langsam zu. Diese Zunahme beruht auf der Entstehung des Radiothoriums aus dem Mesothorium-2. Das Radiothorium (Hahn 1905) sendet α-Strahlen aus und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 737 Tagen.

Die relativ große Beständigkeit, durch welche das Mesothorium-1 und das Radiothorium ausgezeichnet sind, bedeuten eine große Erschwerung der direkten radioaktiven Analyse dieses ersten Teiles der Zerfallsreihe des Thoriums. Die oben besprochenen Beziehungen zwischen dem Thorium, Mesothorium und Radiothorium sind daher von Hahn nicht dadurch aufgeklärt worden, daß in der üblichen Weise die zeitliche Veränderung der Aktivität einzelner Präparate verfolgt wurde, sondern indem die Aktivitäten verschieden alter Produkte der Thoriumfabrikation miteinander verglichen wurden. Bei der technischen Darstellung von Thorpräparaten verbleibt das Radiothorium gänzlich bei dem Thorium, während das Mesothorium sich in den Rückständen vorfindet. Durch den Zerfall des Radiothoriums nimmt die Aktivität frisch dargestellter Thoriumpräparate zunächst ab bis zu einem Minimum, das nach etwa 4½ Jahren erreicht wird. Der hierauf beginnende Anstieg, der auf der Entstehung von Mesothorium und der Neubildung von Radiothorium beruht, dauert lange an und ist nach 12 Jahren noch nicht beendigt. Mit den hieraus berechneten Halbwertszeiten des Mesothoriums und Radiothoriums stehen die bisher vorliegenden Beobachtungen Hahns über die Zunahme der Aktivität von Mesothoriumpräparaten in gutem Einklang.

Die Aktivität eines Mesothoriumpräparates muß nach etwa 3,2 Jahren ein Maximum erreichen und nach Ueberschreitung des Maximums schließlich mit der Halbwertszeit von 5,5 Jahren des Mesothorium-1 abnehmen. Die Mesothoriumpräparate stellen daher relativ langlebige Strahlungsquellen dar. Diese Eigenschaft der Mesothoriumpräparate im Verein mit ihrer hohen spezifischen Aktivität (vgl. O. Hahn, Phys. Zeitschr. 1911, S. 148) haben dem Mesothorium einen Platz neben dem Radium in der Verwendung zu medizinischen Zwecken verschafft.

11b) Thorium-X, Thoriumemana-

tion, aktiver Niederschlag des Thoriums. Die Umwandlungsprodukte des Radiothoriums haben alle eine so geringe Lebensdauer, daß sie bei den bisher betrachteten Prozessen stets als im Gleichgewicht mit dem Radiothorium befindlich angesehen werden konnten. Versetzt man die saure Lösung eines Thoriumsalzes oder eines anderen, Radiothorium enthaltenden Präparates mit Ammoniak, so bleibt in dem Filtrat außer etwa vorhandenem Mesothorium eine geringe Menge eines stark aktiven Stoffes zurück, der von Rutherford und Soddy Thorium-X genannt worden ist. An der Hand der Beobachtungen über die Entstehung und Umwandlung dieses Stoffes ist von Rutherford und Soddy die Zerfallstheorie entwickelt worden.

Das Thorium-X sendet α-Strahlen sowie weiche β-Strahlen aus und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 3,65 Tagen. Das von Thorium-X befreite Thorium besitzt nur noch etwa 25 % seiner normalen Aktivität und gewinnt diese infolge der Neubildung von Thorium-X mit der Halbwertszeit von gleichfalls 3,65 Tagen zurück. Während Thoriumsalze unter normalen Umständen die Eigenschaft besitzen, ein radioaktives Gas, die Thoriumemanation, zu entwickeln, hat das von Thorium-X befreite Thorium diese Fähigkeit verloren. Dagegen vermag Thorium-X in reichlichem Maße Emanation abzugeben. Das Thorium-X ist daher als die Muttersubstanz der Emanation anzusehen. Hiermit steht die Beobachtung im Einklang, daß die Menge der von dem Thorium-X abgegebenen Emanation nach demselben Gesetze abnimmt, wie die Aktivität des Thorium-X; es herrscht stets Proportionalität zwischen der Menge des Thorium-X und der Menge der von ihm entwickelten Emanation, wie es bei der Annahme eines genetischen Zusammenhanges zwischen Thorium-X und der Emanation zu erwarten ist.

Die Thoriumemanation gleicht in ihrem chemischen und physikalischen Verhalten den Emanationen des Radiums und Aktiniums; wie diese gehört sie der Gruppe der Edelgase zu. Sie zerfällt unter Aussendung von α-Strahlen mit einer Halbwertszeit von 53 Sekunden unter Bildung eines aus fünf Produkten, Th-A, Th-B, Th-C_1, Th-C_2 und Th-D, bestehenden aktiven Niederschlages. Die wichtigsten Eigenschaften der Produkte des aktiven Niederschlages sind aus der im Abschnitt 12b gegebenen Tabelle zu ersehen.

Ueber das Endprodukt der Umwandlung des Thoriums ist sicheres noch nicht bekannt. Die Zahl der bei der sukzessiven Umwandlung des Thoriums ausgesandten α-Partikeln beträgt mindestens 6, da bei der Umwandlung eines Atomes der Emanation nach den Versuchen von Bronson (Phil. Mag. 1908) und Geiger und Marsden (Phys. Zeitschr. 1910) mehr als eine α-Partikel ausgesandt zu werden scheint. Da das Atomgewicht des Thoriums gleich 232,4 ist, so kann das Atomgewicht des Endproduktes höchstens 208,4 betragen, eine Zahl, die dem Atomgewicht 208,0 des Wismuts sehr nahe kommt.

12. Uebersicht über die radioaktiven Elemente; Alter radioaktiver Mineralien; Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Wärmehaushalt der Erde. **12a)** Radioaktivität des Kaliums und Rubidiums. Wie bereits in der Einleitung erwähnt ist, hat bisher eine Radioaktivität außer bei dem Uran, Thorium, Aktinium und ihren Zerfallsprodukten nur noch bei dem Kalium und Rubidium nachgewiesen werden können. Die Aktivität der Kalium- und Rubidiumsalze ist ihrem Kalium- bezw. Rubidiumgehalt angenähert proportional, was für die Annahme spricht, daß die Aktivität der Salze auf einer atomistischen Eigenschaft des Kaliums bezw. Rubidiums beruht. Eine Abtrennung von Zerfallsprodukten ist bisher nicht gelungen. Die Aktivität der Kaliumsalze beträgt etwa $^1/_{1000}$ der Aktivität des Urans; das Rubidium besitzt eine etwas höhere Aktivität als das Kalium. Die von Kalium und Rubidium ausgesandten Strahlen sind offenbar β-Strahlen, sie werden im Magnetfeld wie Kathodenstrahlen abgelenkt. Die Rubidiumstrahlen sind etwa zehnmal leichter absorbierbar als die Kaliumstrahlen.

12 b) Zerfallsreihen. Eine Zusammenstellung der bisher bekannten Glieder der Zerfallsreihen des Uran-Radiums, Thoriums und Aktiniums ist in der folgenden Tabelle gegeben. Die Anordnung der Tabelle ist so gewählt, daß die Emanationen an korrespondierenden Stellen stehen.

(Tabelle siehe Seite 72 und 73.)

Obwohl unsere Kenntnis der radioaktiven Stoffe noch keineswegs als abgeschlossen gelten kann, so sei doch auf einige Beziehungen hingewiesen, welche zwischen den Zerfallsreihen des Uran-Radiums, Thoriums und Aktiniums zu bestehen scheinen.

Jedes α-Strahlenprodukt sendet nur eine Art von α-Strahlen aus. Die einzige Ausnahme von dieser Regel bildete bisher das Thorium-C, welches nach den Versuchen von Hahn zwei verschiedene Arten von α-Strahlen auszusenden schien. Aus neueren Versuchen von Marsden und Barratt (Proc. Phys. Soc. 1911) geht jedoch mit Sicherheit hervor, daß die α-Partikeln des Th-C von zwei voneinander verschiedenen Stoffen stammen, die zueinander in ähnlicher Beziehung stehen wie Ra-C_1 und Ra-C_2. Die Zahl der in der Zeiteinheit von den beiden Produkten ausge-

Uran-Radiumreihe			Thoriumreihe		
Produkt	Halbwertszeit	Strahlung	Produkt	Halbwertszeit	Strahlung
Uran	$5 \cdot 10^9$ Jahre	α: 2,5 cm	Thorium	c. 10^{10} Jahre	α: 2,72 cm
Radiouran	$2 \cdot 10^6$ Jahre	α: 2,9 cm	Mesothorium —1	5,5 Jahre	—
{ Uran-X	24,6 Tage	β, γ	Mesothorium —2	6,2 Std.	β, γ
{ Uran-Y	1,5 Tage	(α), β			
Jonium	$2 \cdot 10^5$ Jahre	α: 3,0 cm	Radiothorium	2,0 Jahre	α: 3,9 cm
Radium	1780 Jahre	α: 3,3 cm weiche β-Str.	Th-X	3,65 Tage	α: 5,7 cm weiche β-Str.
Ra-Emanation	3,85 Tage	α: 4,15 cm	Th-Emanation	53 Sek.	α: 5,5 cm
Ra-A	3,0 Minuten	α: 4,75 cm	Th-A	0,14 Sek.	α: ? cm
Ra-B	26,7 Minuten	weiche β-Str., γ	Th-B	10,6 Std.	weiche β-Str.
Ra-C = { C_1 +	19,5 Minuten	α: 7,0 cm; β, γ	Th-C = { C_1 +	55 Min.	α: 5,0 cm
C_2	1,38 Minuten	β, (γ)	C_2	?	α: 8,6 cm
Ra-D	c. 16,5 Jahre	weiche β-Str.	Th-D	3,1 Min.	β, γ
Ra-E	5,0 Tage	β, γ			
Ra-F	136 Tage	α: 3,77 cm			

sandten α-Partikeln ist nicht bei beiden gleich, so daß Th-C_2 ein Seitenlinienprodukt des Th-C_1 zu sein scheint.

Rutherford hat im Jahre 1907 darauf aufmerksam gemacht, daß im allgemeinen die Reichweite der α-Partikeln um so größer ist, je kleiner die Halbwertszeit des die α-Strahlen aussendenden Stoffes ist. Trägt man die Logarithmen der Reichweiten als Abszissen, die Logarithmen der radioaktiven Konstanten λ der betreffenden Stoffe als Ordinaten auf, so ordnen sich, wie Geiger und Nuttall (Phil. Mag. 1911 und 1912) gefunden haben, die Glieder der Umwandlungsreihen des Uran-Radiums (mit Ausnahme von Ra-C) und des Aktiniums je einer geraden Linie zu. Diese Beziehung zwischen den Reichweiten und den radioaktiven Konstanten ist von Geiger und Nuttall benutzt worden, um die Halbwertszeiten des Ioniums und Radiourans (vgl. Abschnitt 9b und 9d) zu berechnen. Auch die Zahlen für die α-Strahlenprodukte der Thoriumreihe ordnen sich nach vorläufigen Versuchen in eine gerade Linie ein.

Die Tabelle läßt erkennen, daß in vielen Fällen Produkte, die an korrespondierenden Stellen der Umwandlungsreihen stehen, ein ähnliches Verhalten zeigen. So gehen bei allen drei Reihen den Emanationen zwei α-Strahlen aussendende Stoffe unmittelbar voraus. Die ersten Zerfallsprodukte der Emanationen sind relativ kurzlebige Stoffe, die unter Aussendung von α-Partikeln zerfallen. Ebenfalls gleichen die B-Produkte einander in ihrem allgemeinen Verhalten, denn jedes von ihnen sendet leicht absorbierbare β-Strahlen aus, auch alle D-Produkte senden β-Strahlen aus; ferner werden von keinem der B- und D-Produkte α-Strahlen ausgesandt. Bei den C-Produkten versagt jedoch bisher die Analogie. Ra-C_1 und Th-C_1 gleichen sich zwar, wie oben erwähnt, darin, daß beide außer den D-Produkten Seitenprodukte bilden; die Strahlung dieser Seitenprodukte ist jedoch verschieden. Ferner besteht bei dem Aktinium-C bisher kein sicherer Anhalt für die Annahme eines Seitenproduktes.[1])

Im Gegensatz zu dem einfachen Zusammenhange, welcher zwischen der Halbwertszeit eines sich umwandelnden Stoffes und seiner α-Strahlung besteht, scheint der Vorgang der Aussendung von β-Strahlen sich einem einfachen Schema nicht einzufügen. Von Bayer, Hahn und Meitner (Phys. Zeitschr. 1911) ist gezeigt, daß in einer Reihe von Fällen ein β-Strahlen aussendender Stoff mehrere Arten von β-Strahlen von verschiedenem Durchdringungsvermögen aussendet, und neuerdings hat Danysz (Le Radium 1912) gefunden, daß ein β-Strahlenbündel, das von einem mit Radiumemanation gefüllten Röhrchen ausgeht, durch ein Magnetfeld in nicht weniger als 23 einzelne Bündel zerlegt wird.

Auf Analogien in dem elektrochemischen Verhalten der Glieder der aktiven Niederschläge ist verschiedentlich in der Literatur hingewiesen. Nach einer eingehenden Untersuchung von v. Hevesy (Phil. Mag. 1912) besitzen Ra-B, Th-B und Akt-B einerseits, Ra-C, Th-C und Akt-C andererseits die gleichen elektrochemischen Eigenschaften. Bei sehr geringen Elektrodenpotentialen werden die C-Produkte fast rein abgeschieden; bei

---

[1]) Anm. bei der Korr. Vgl. die kürzlich erschienenen Arbeiten von Marsden und Barratt (Proc. Phys. Soc. 24, S. 50, 1912), Meitner (Phys. Zeitschr. 13, S. 623, 1912); Fajans (Phys. Zeitschr. 13, S. 699, 1912).

Produkt	Aktiniumreihe Halbwertszeit		Strahlung
Aktinium	—		—
Radioakt.	19,5	Tage	α: 4,8 cm weiche β-Str.
Akt.-X	10,5	Tage	α: 4,4 cm
Akt-Em.	3,9	Sek.	α: 5,7 cm
Akt-A	0,002	Sek.	α: 6,5 cm
Akt-B	36	Min.	weiche β-Str.
Akt-C	2,15	Min.	α: 5,4 cm
Akt-D	4,71	Min.	β, γ

einem Elektrodenpotential von — 0,6 Volt, gemessen gegen die Normalkalomelektrode, treten B und C im Gleichgewichtsbetrage auf der Elektrode auf, und bei höheren Potentialen erhält man hauptsächlich die B-Produkte.

In ähnlicher Weise unterscheiden sich die B- und C-Produkte voneinander auch hinsichtlich ihres Verhaltens gegenüber hohen Temperaturen, da alle B-Produkte sich leichter verflüchtigen lassen als die C-Produkte.

Das Mitgeteilte mag genügen, um zu zeigen, daß die Umwandlungsreihen der radioaktiven Stoffe in mancher Beziehung einander ähnlich sind, und daß daher wahrscheinlich auch eine Analogie in der Struktur der zerfallenden Atome besteht. Versuche, die Konstitution der Atome durch elektrische Modelle zu veranschaulichen, sind von Lord Kelvin, J. J. Thomson und Rutherford angestellt worden, jedoch ist bisher eine Struktur noch nicht gefunden worden, die alle von den Versuchsresultaten geforderten Bedingungen erfüllt.

12c) Alter radioaktiver Mineralien. Die auffallende Erscheinung, daß radioaktive Mineralien große Mengen von Helium enthalten, hat durch den Nachweis, daß die von den radioaktiven Stoffen ausgesandten α-Partikeln Heliumatome sind, eine einfache Erklärung gefunden. Aus dem Heliumgehalt eines Minerals und der Heliummenge, die in ihm in einem Jahre neu gebildet wird, läßt sich, worauf zuerst von Rutherford hingewiesen ist, das Alter des Minerals berechnen. Wenn angenommen werden dürfte, daß aus dem Mineral seit seiner Entstehung kein Helium entwichen wäre, so würde die Zeit, die zur Aufspeicherung des Heliums erforderlich war, zugleich das Alter des Minerals angeben. In Wirklichkeit wird jedoch ein Teil des Heliums aus den Mineralien entweichen. Die Berechnungen werden daher für das Alter der Mineralien nur eine untere Grenze liefern, die dem wahren Alter um so näher kommen wird, je kompakter das Mineral ist.

Die Geschwindigkeit, mit der Helium in Uranmineralien entsteht, ist von Rutherford zuerst aus Berechnungen der Zerfallsgeschwindigkeit des Radiums ermittelt worden. Neuerdings ist die Zahl der von radioaktiven Mineralien ausgesandten α-Partikeln nach der Szintillationsmethode von Rutherford und Geiger (Phil. Mag. 1910) direkt bestimmt und in guter Uebereinstimmung mit dem aus der Zahl der vom Radium ausgesandten α-Partikeln berechneten Werte gefunden worden. Aus diesen Beobachtungen ergeben sich für die Geschwindigkeiten der Entstehung des Heliums aus 1 g Uran bezw. Thorium die Werte 2,75 bezw. $3{,}1 \times 10^{-8}$ ccm Helium pro Jahr. Strutt hat an einigen Proben aus Pechblende und Thorium die Geschwindigkeit, mit der Helium aus diesen Mineralien entsteht, direkt gemessen und gute Uebereinstimmung zwischen den beobachteten und berechneten Werten gefunden.

Nach den Messungen von Strutt (Proc. Roy. Soc. 1910) sind in der folgenden Tabelle numerische Daten für das Minimalalter von Mineralien aus verschiedenen geologischen Epochen gegeben.

Mineral	Geologische Epoche	Minimalalter des Minerals in Jahren
Sphärosidenit	Oligocän	8 400 000
Hämatit	Eocän	31 000 000
Hämatit	Kohle-führender Kalkstein	150 000 000
Sphene	Archäisch	710 000 000

Die erhaltenen Resultate stehen hinsichtlich der zeitlichen Aufeinanderfolge der Epochen mit den Ergebnissen der geologischen Forschung gut im Einklang. Betrachtungen über die Entstehung der Flußtäler durch Erosion und über die Bildung der großen Salzablagerungen haben zu einer Schätzung des Alters der Erdkruste auf etwa 1000 Millionen Jahre geführt, und mit ähnlichen Werten glaubt man rechnen

zu müssen, um die Schrumpfung der Erdoberfläche und die Evolution der Organismen zu erklären.

12d) Bedeutung der radioaktiven Stoffe für den Wärmehaushalt der Erde. Das Vorkommen der radioaktiven Stoffe ist nicht auf die radioaktiven Mineralien beschränkt. Es ist bekannt, daß eine Reihe von Quellen einen beträchtlichen Gehalt an radioaktiven Stoffen besitzt, von dem man zu therapeutischen Zwecken Gebrauch gemacht hat. Ferner lassen sich, wie bereits im Abschnitt 1d erwähnt wurde, fast in allen Bestandteilen der Erdoberfläche geringe Mengen von Radium und Thorium mit Hilfe der elektrischen Meßmethode nachweisen. Nach den Untersuchungen von Strutt und Joly kann man annehmen, daß Gesteine durchschnittlich 10^{-11} bis 10^{-12} g Radium und etwa 10^{-4} bis 10^{-5} g Thorium pro g enthalten, während der Gehalt des Meerwassers an Radium etwa 10^{-15} und an Thorium etwa 10^{-8} g beträgt.

Der Einfluß, welchen der Gehalt des Erdbodens an radioaktiven Stoffen auf die elektrischen Eigenschaften der Atmosphäre ausübt, findet sich in dem Artikel über „Atmosphärische Elektrizität" eingehend behandelt. Hier beschränken wir uns daher darauf, die Wirkung der radioaktiven Stoffe auf den Wärmehaushalt der Erde kurz zu behandeln.

Von Rutherford ist berechnet worden, wieviel Radium erforderlich wäre, um den Wärmeverlust zu decken, den die Erde durch Ausstrahlung erfährt. Nimmt man die mittlere Wärmeleitfähigkeit der Erdkruste zu 0,0004 cm-g-sec-Einheiten und den Temperaturgradienten an der Erdoberfläche zu 0,00037° pro cm an, so ergibt sich, daß $2,2 \times 10^{-7}$ Cal im Jahre in 1 ccm der Erde entwickelt werden müssen, um die Temperatur der Erde konstant zu erhalten. Da 1 g Radium im Jahre 1 030 000 Cal entwickelt, so sind $2,1 \times 10^{-13}$ g Radium pro ccm der Erde ausreichend, um diese Wärmemenge zu liefern. Nach den oben besprochenen Versuchen von Strutt und Joly beträgt der Radiumgehalt von Gesteinen, darunter von solchen, die einen großen Teil der Erdkruste ausmachen, das 5- bis 10-fache dieses Wertes. Zieht man ferner in Betracht, daß außer dem Radium auch das Uran, Thorium und Aktinium einen bedeutenden Beitrag zur Wärmeentwickelung beisteuern werden, so ergibt sich, daß die Erde nicht in ihrem ganzen Volumen einen so hohen Gehalt an radioaktiven Stoffen besitzen kann, wie an ihrer Oberfläche, da die Wärmeentwickelung durch die radioaktiven Stoffe sonst größer wäre, als erforderlich ist, um die Erde auf ihrer jetzigen Temperatur zu erhalten. Strutt hat daher die Annahme gemacht, daß der Kern der Erde fast frei von radioaktiven Stoffen ist, und der hohe Gehalt an radioaktiven Stoffen sich auf eine Oberflächenkruste von etwa 70 km Tiefe beschränkt. Die Vorstellung einer Kruste von dieser Dicke, deren Eigenschaften von denen des Erdinnern verschieden sind, befindet sich in Uebereinstimmung mit seismologischen Beobachtungen und Folgerungen, die aus dem Temperaturgradienten zu ziehen sind.

Literatur. *Die Literatur ist bis zum 1. 4. 1912 berücksichtigt. Die Literaturangaben im Text beschränken sich auf Arbeiten der neuesten Zeit. Hinweise auf ältere Untersuchungen finden sich in den im folgenden aufgeführten Werken, von denen die beiden ersten die umfassendste Behandlung des ganzen Gebietes enthalten.* — ***E. Rutherford**, Die Radioaktivität, Berlin 1907.* — ***Mme. P. Curie**, Die Radioaktivität, Leipzig 1911.* — ***E. Rutherford**, Radioaktive Umwandlungen, Braunschweig 1907.* — ***P. Gruner**, Kurzes Lehrbuch der Radioaktivität. Berlin 1911.* — *Zusammenfassende Berichte über Teilgebiete und Literaturzusammenstellungen finden sich in dem Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, Leipzig.*

M. Levin.

Radioaktivität der Mineralien.

1. Definition. Radioaktive Mineralien sind Uran- oder Thorhaltig.[1]) 2. Vorkommen. 3. Beschreibung der Uranmineralien.

1. Definition. Radioaktive Mineralien sind uran- oder thorhaltig. Unter den radioaktiven Substanzen verstehen wir heute Elemente, deren Atome eine spontane Zersetzung erleiden und die sich dabei umwandeln in neue Elemente. Der Umwandlungsprozeß ist immer begleitet — und dadurch können wir ihn überhaupt erst beobachten — von der Aussendung kleinster Teilchen, die elektrisch geladen sind und die die Luft bei ihrem Durchgang ionisieren. Diese merkwürdige Strahlung ist, wie gesagt, allen sich „desaggregierenden" Elementen eigentümlich und deswegen bezeichnet man sie auch allgemein als radioaktiv. Es gibt nun schon eine große Zahl — mehrere Dutzend — solcher radioaktiver Elemente und fast jedes Jahr werden einige neue hinzugefunden. Für sie alle ist eigentümlich und außerordentlich charakteristisch, daß sie in der Natur immer zusammen mit Thorium oder Uran vorkommen. Die heute allgemein an-

[1]) Die Thormineralien sind in einem besonderen Artikel „Erden" (Mineralien mit seltenen Erden) behandelt.

erkannte Rutherfordsche Zerfallstheorie erklärt diese Tatsache damit, daß sie sagt: Alle radioaktiven Elemente sind Zersetzungsprodukte von Uranium oder Thorium und zwar ist speziell das Radium aus dem Uran als Muttersubstanz entstanden. In ihren weiteren Konsequenzen führt diese Theorie zu dem Resultat, daß in allen Uranmineralien das Mengenverhältnis von Ur: Ra immer das gleiche sein muß. Strutt hat seinerzeit diese interessante Konsequenz der Rutherfordschen Theorie geprüft und sie auch tatsächlich als richtig befunden, wie die folgende Tabelle beweist. Unter „Substanz" ist der Name des Minerals angegeben, unter I sein Radiumgehalt in willkürlichen Einheiten, unter II der Urangehalt in Grammen pro Gramm Substanz und unter III das Verhältnis von I/II, das nach Rutherford konstant sein soll und es auch, wie man sieht, ist.

Substanz	Fundort	I	II	III
Uraninit	Nord-Karolina	170,0	0,7465	228
„	Kolorado	155,1	0,6961	223
Gummit	Nord-Karolina	147,0	0,6538	225
Uraninit	Joachimstal	139,6	0,6174	226
„	Sachsen	115,6	0,5064	228
Samarskit	Nord-Karolina	23,4	0,1044	224
Orangit	Norwegen	23,1	0,1034	223
Euxenit	„	19,9	0,0871	228
Thorit	„	16,6	0,0754	220
Fergusonit	„	12,0	0,0557	215
Aeschynit	„	10,0	0,0452	221
Xenotim	„	1,54	0,0070	220

Rechnet man die unter I angegebenen Zahlen auf Gramm Ra um, so ergibt sich, daß 1 Tonne Uran allgemein etwa 0,38 g Ra enthält.

Allerdings gibt es auch Mineralien, bei denen III nicht den obigen Wert besitzt. Zum Beispiel enthalten gewisse Pechblenden in Norwegen und Cornwall zu wenig Radium. Dieser scheinbare Widerspruch gegen die Theorie erklärt sich aber sehr einfach daraus, daß aus letztgenannten Mineralien ein Teil des Radiums durch Einwirkung von Lösungen usw. ausgelaugt ist, daß mit anderen Worten das Gleichgewicht zwischen Ra und Ur durch äußere Einflüsse gestört ist.

Aus dem Vorhergehenden ergibt sich, daß eine Beschreibung der radioaktiven Mineralien gleichbedeutend ist mit einer der Thor- und Uran-haltigen. Da nun die Thormineralien schon in einem Artikel über „Mineralien mit seltenen Erden" von mir behandelt worden sind, auf den ich hiermit verweise, so gehe ich hier nur auf die Uranmineralien ein.

2. Vorkommen. Von den Uranmineralien sind diejenigen, welche auf primärem Wege entstanden sind, die wichtigsten. Sie kommen besonders häufig vor in sauren Eruptivgesteinen, Syeniten, Pegmatiten usw. Auf den Gängen von Joachimstal ist das Uranpecherz — das weitaus häufigste Uranmineral — mit Silber-, Nickel-, Kobalt-, Wismut- und Arsenerzen vergesellschaftet und ähnliches gilt für die vielen anderen Vorkommen von Uranpecherz im Erzgebirge.

In der nun folgenden Einzelbeschreibung sind die Mineralien in der gleichen Reihenfolge, wie sie Groth in seinen Tabellen gewählt hat, behandelt.

3. Beschreibung der Uranmineralien.

3a) Karbonate. Praktisch reines Uranylkarbonat von der Formel UO_2CO_3 ist erst ganz vor kurzem von Marckwald in Glimmerbrüchen im Urugurugebirge in Deutsch-Ostafrika gefunden und nach E. Rutherford Rutherfordin benannt worden. Es kommt in den Glimmer eingesprengt in kleinen oder großen, oft eine Manneslast übersteigenden Kristallen vor. Eine nähere Untersuchung ergab, daß der Rutherfordin unter Pseudomorphosebildung aus Pechblende entstanden ist. Seine Farbe ist gelb. Das spezifische Gewicht beträgt 4,82. Durch den hohen Urangehalt besitzt das Mineral auch eine bedeutende Radioaktivität, die die der Joachimstaler Pechblende noch etwa um 20% übersteigt.

Ein wasserhaltiges Uran-Kalkkarbonat, dessen Zusamenmsetzung die Formel $2CaCO_3 + UC_2O_6 + 10H_2O$ gut wiedergibt, ist der Uranothallit. Er kristallisiert rhombisch: a:b:c = 0,9539:1:0,7826. Die Härte ist 2,5 bis 3. Er kommt in kleinkörnigen Aggregaten eingesprengt und als Anflug oder in plattenförmigen Ueberzügen vor, hat eine zeisiggrüne Farbe, blaßzeisiggrünen Strich, ist helldurchsichtig, bis durchscheinend. Glasglanz, auf den Spaltflächen Perlmutterglanz. Er ist sekundärer Entstehung und findet sich in Joachimstal in alten Strecken,

wo früher Uran gebrochen wurde. Dem Uranothallit steht chemisch wie physikalisch sehr nahe der Liebigit. Er ist auch ein wasserhaltiges Urankalkkarbonat. Sein Kristallsystem ist nicht bekannt. Seine Härte beträgt 2 bis 2,5 und außerdem ist es ausgezeichnet durch eine schön apfelgrüne Farbe. Auch der Voglit ist dem Uranothallit sehr nahe verwandt und unterscheidet sich von ihm eigentlich nur dadurch, daß er bis zu 8% Cu enthält.

3b) Uranate. Das weitaus wichtigste von allen Uranmineralien ist das Uranpecherz oder der Uraninit. Er kristallisiert regulär holoedrisch. Die an ihm häufigste Kristallform ist das Oktaeder, manchmal ist auch der Würfel und das Rhombendodekaeder angedeutet. Gute Kristalle sind freilich sehr selten, meist tritt das Uranpecherz derb auf und sieht amorph aus. Der Bruch ist muschlig. Die Härte beträgt 3 bis 6 und sein spezifisches Gewicht 9 bis 9,7. Es ist pechschwarz, daher der Name Uranpecherz, und zeigt auch auf frischem Bruch einen Pechglanz. Schon aus den unsicheren Angaben über das spezifische Gewicht und die Härte geht hervor, daß die Zusammensetzung des Uraninits ziemlich stark schwankt. Infolgedessen ist man sich auch noch nicht über seine chemische Konstitution einig. Vorläufig nehmen wir an, daß das Pecherz ein Salz der Uransäure $U(OH)_6$ sei, deren Wasserstoff zum größten Teil durch 4wertiges Uran ersetzt ist. Wäre das vollständig der Fall, dann käme ihm die Formel U_3O_8 zu, die man auch gelegentlich angegeben findet. In Wirklichkeit ist regelmäßig ein Teil des Urans ersetzt durch Blei. Gewöhnlich sind auch die seltenen Erden, speziell Thorium vorhanden. Im Erzgebirge, wo das Uranpecherz wie gesagt auf Erzgängen mit Blei, Silber usw. zusammen vorkommt, wird es neuerdings abgebaut als Hauptmaterial zur Gewinnung des Radiums und das gleiche gilt von seinem Vorkommen in Schweden, Cornwall usw. Aber auch das so gewonnene Uran wird mehr und mehr verwandt zur Herstellung von Uranfarben für die Porzellanmalerei usw. Das Uranpecherz verwittert außerordentlich leicht und infolgedessen findet man immer mit ihm zusammen eine Menge von Umwandlungsprodukten, von denen ich einen Teil gleich hier behandeln will. Das Pittinerz ist ein verwitterter Uraninit von geringerem spezifischem Gewichte (ca. 5) und geringerer Härte (3 bis 4) und weiterhin charakterisiert durch einen grünen Strich. Auch der Coracit ist nichts anderes als ein stark verunreinigtes, derbes Uranpecherz, das an der Nordküste des Lake superior vorkommt. Für den Cleveit ist besonders charakteristisch sein ebenfalls durch die Verwitterung bedingter Gehalt an H_2O. Außerdem sind in ihm die seltenen Erden, Argon und Helium in ziemlich großer Menge vertreten. Speziell Argon und Helium wurden in dem Cleveit zum erstenmal auf der Erde nachgewiesen. Auch der Cleveit ist regulär und zeigt als Kristallformen meist das Rhombendodekaeder, den Würfel und das Oktaeder. Gewöhnlich kommt er aber nur in unregelmäßigen Körnern vor. Seine Härte ist 5,5, das spezifische Gewicht 7,5, die Farbe eisenschwarz. Der Bröggerit ist ein stark Thor-haltiges — daher auch der Name Thoruranin — und der Uranoniobit ein Nb_2O_5-haltiges Pecherz. Auch den Uranosphärit stellt man am besten hierher. Seine Zusammensetzung wird angegeben durch die Formel $Bi_2U_2O_9.3H_2O$. Er bildet orangegelbe bis ziegelrote radialfaserige Warzen. Seine Härte beträgt 2 bis 3, das spezifische Gewicht 6,4. Der Uranocker oder Uranopilit ist ebenfalls ein Zersetzungsprodukt des Uranpecherzes, auf dem er als samtähnliche, gelbe Inkrustationen in Johanngeorgenstadt und Joachimstal vorkommt. Er bildet tafelige Kriställchen, die schief auslöschen. Seiner chemischen Zusammensetzung nach ist er ein wasserhaltiges Kalksulfouranat. Noch mehr Schwefelsäure als der Uranocker enthält der Johannit, auch Uranvitriol genannt. Ca ist nicht in ihm vorhanden, dagegen etwas Cu und ferner wiederum Wasser. Der Johannit kristallisiert monoklin $\beta = 94^\circ 20'$. Die Kristalle sind sehr klein, besitzen eine prismatische Spaltbarkeit und bilden meist nierenförmige Aggregate. Die Härte ist 2 bis 2,5. Farbe und Strich grasgrün. Die Uranblüte (Zippeit) ist vielleicht nur eine Varietät des Johannit. Auf alle Fälle ist sie ihm in jeder Beziehung außerordentlich ähnlich. Sie scheint nur sehr wenig Cu zu enthalten. Eine in Joachimstal gefundene Uranblüte ist sogar vollkommen reines wasserhaltiges Uransulfat.

3c) Vanadate, Niobate usw. Zu dieser Gruppe stellt man am besten zwei erst kürzlich entdeckte Mineralien, nämlich den Carnotit und den Ferghanit. Der Carnotit ist ein Kalium-, Calcium- und Baryum-haltiges Vanadat-Uranat. Er bildet doppelbrechende Körnchen, die aber vielleicht nicht einheitlich sind, sondern ein Gemenge mehrerer Mineralien darstellen. Gefunden wurde das Mineral in ziemlich großer Menge auf Höhlungen eines Sandsteins im westlichen Colorado. Für den Ferghanit wird die Formel angegeben: $U_3(VO_4)_2.6H_2O$ + Spuren von Lithium. Es ist ein hellgelbes, schuppenförmiges Mineral, das ausgezeichnet spaltet. Die Härte ist gering (ca. 2), das spezifische Gewicht beträgt 3,31. Der Ferghanit ist 2-achsig. Der Achsenwinkel ist

groß. Samarskit und Annerödit, die auch hierher gehören, sind in dem Artikel „Erden" (Mineralien mit seltenen Erden) behandelt, da die seltenen Erden in ihnen gegenüber dem Uran vorherrschen.

3d) Phosphate und Arsenate. Zu dieser Gruppe gehören eine ganze Reihe wichtiger Uranmineralien. Sie sind alle wasserhaltig. Dem Trögerit kommt die Formel zu $(UO_2)_3\ (AsO_4)_2 + 12H_2O$. Er kristallisiert monoklin $\beta = 100^0$. Sein Habitus ist ähnlich dem des Gipses. Die Kristalle sind tafelig ausgebildet und gelb gefärbt. Phosphuranylit ist ein dem Trögerit ähnliches Uranphosphat. Genauer sind seine Eigenschaften nicht bekannt. Sehr kompliziert zusammengesetzt ist der Walpurgin. Wie der Trögerit ist er auch ein wasserhaltiges Uranarseniat, enthält aber außerdem noch Wismut. Er kristallisiert triklin, scheint aber zunächst monoklin zu sein, weil er fast immer in Zwillingen vorkommt. Auch er ist gipsähnlich und die Kristalle sind taflig ausgebildet. Er besitzt eine ziemlich deutliche Spaltbarkeit, ist wachsgelb und fettglänzend.

Die nun folgenden Mineralien faßt man häufig zu einer Gruppe zusammen und bezeichnet sie als Uranglimmer, weil sie erstens alle eine analoge chemische Zusammensetzung haben und zweitens auch kristallographisch nahe miteinander verwandt sind. Ein Teil von ihnen kristallisiert rhombisch, ein Teil tetragonal. Diese beiden Gruppen sind aber wiederum in den Achsenverhältnissen und ihrer Kristalltracht so ähnlich, daß sie jedenfalls untereinander isodimorph sind. Der Kalkuranit — auch Autunit oder Uranglimmer schlechthin genannt — kristallisiert rhombisch. Das Achsenverhältnis ist a:b:c = 0,9876:1:2,853. a ist also nahezu gleich 1, und infolgedessen weichen die Formen des Minerals, wie ich schon andeutete, nur sehr wenig von dem tetragonalen Kupferuranit ab, dessen Achsenverhältnis ist 1:1:2,9382. Als Formel wird für den Kalkuranit angegeben: $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 + 8H_2O$. Die Kristalle sind meist tafelig ausgebildet, stumpfkantig und kommen oft drusenförmig aggregiert vor. Sie spalten sehr gut nach der Basis, sind zeisiggrün bis schwefelgelb, haben einen gelben Strich und Perlmutterglanz. Fritzscheit enthält Mangan statt Calcium und hat eine rötlich-braune Farbe, stimmt aber in seinen sonstigen Eigenschaften mit dem Kalkuranit überein. Auch der Uranospinit, das dem Kalkuranit entsprechende und mit ihm isomorphe Arseniat ist mit diesem physikalisch und kristallographisch beinahe identisch. Er kristallisiert ebenfalls rhombisch und die Achsenverhältnisse sind fast die gleichen wie beim Kalkuranit, nur liegt der Wert für a noch näher an 1. Ganz analoges gilt für den Uranocircit oder Baryumuranit. Er ist ein Kalkuranit, bei dem das Calcium durch Baryum ersetzt ist.

Zu der Reihe der tetragonalen Uranglimmer gehört in erster Linie der Kupferuranit (Torbernit, Chalkolith) von der Formel: $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 + 8H_2O$. Chemisch ist er also ein Kalkuranit, bei dem das Calcium durch Cu ersetzt ist. Auf die nahe kristallographische Verwandtschaft der beiden Mineralien habe ich schon hingewiesen. Sie kommt auch dadurch zum Ausdruck, daß die beiden oft gesetzmäßige Verwachsungen miteinander bilden. Die Kristalle des Kupferuranit sind meist sehr dünn, tafelig und immer nur klein, aber häufiger als die des Kalkuranit. Sie spalten sehr gut nach der Basis und auch nach der vorderen Endfläche. Sie sind grün gefärbt, haben einen apfelgrünen Strich und zeigen Perlmutterglanz. Das entsprechende Kupfer-Uranarseniat ist der Zeunerit, der isomorph mit dem Kupferuranit ist und diesem außerordentlich ähnelt.

3e) Kristallwasserhaltige Verbindungen von Silikaten mit Uranaten. Nur zwei, zudem nicht sonderlich wichtige Mineralien sind hier zu nennen. Der Uranotil bildet nadelige, kleine Kristalle, die triklin sind und meist büschelförmig aggregiert sind. Er ist gelb und hat ein spezifisches Gewicht von 3,8 bis 3,9. Seine chemische Zusammensetzung gibt die Formel $CaSi_2U_2O_{11} + 5H_2O$ recht gut wieder. Der Uranophan ist ein Kalk-Uransilikat, das zum mindesten chemisch, vielleicht sogar überhaupt mit dem Uranotil identisch ist. Es kommt in derben, honiggelben bis schwärzlich-grünen Massen vor. Seine übrigen Eigenschaften sind noch nicht näher untersucht. Der Gummit endlich ist ein wasserhaltiges Uransilikat mit Calcium, Baryum und Bleigehalt. Es ist ein Zersetzungsprodukt des Uranpecherzes und scheinbar amorph. Es bildet nierenförmige Aggregate, die einen muschligen Bruch besitzen. Seine Härte ist 2,5 bis 3, das spezifische Gewicht ca. 4. Der Gummit hat eine rötliche Farbe, gelben Strich, Fettglanz und ist meist undurchsichtig. Ist der Gummit stark verwittert so bezeichnet man ihn auch als Eliasit.

Literatur. ***Groth,*** *Tabellarische Uebersicht der Mineralien. Braunschweig 1898.* — ***Rutherford,*** *Die Radioaktivität. Berlin 1907.* — ***A. Schwantke,*** *Neue Mineralien. Fortschritte der Mineralogie usw. Bd. I und II.*

A. Ritzel.

Raibler Schichten.

Vgl. den Artikel „Triasformation“.

Rammelsberg
Karl Friedrich.

Geboren am 1. April 1813 zu Berlin; gestorben am 28. Dezember 1899 zu Groß-Lichterfelde. Zunächst widmete er sich der Pharmazie, studierte aber von 1833 an Naturwissenschaften, insbesondere Chemie und Mineralogie zu Berlin und promovierte 1837. 1840 bis 1845 war er Privatdozent, dann außerordentlicher Professor an der Universität, von 1851 an zugleich auch Lehrer der Chemie am königlichen Gewerbeinstitut zu Berlin. Seit 1855 war er Mitglied der Akademie und 1874 bis 1883 ordentlicher Professor. Als Direktor des Universitätslaboratoriums für anorganische Chemie wirkte er dann noch bis zu seiner Versetzung in den Ruhestand (1891).

Seine außerordentlich zahlreichen Untersuchungen über die chemische Natur der Mineralien haben ihm einst seine Autorität auf diesem Gebiete und weiterhin seine hervorragende Bedeutung für die chemische Mineralogie gesichert. Viele Fortschritte und Verbesserungen der chemischen Analyse sind ihm ebenfalls zuzuschreiben. Hier seien als zusammenfassende Werke genannt: „Handwörterbuch des chemischen Teils der Mineralogie“ Berlin 1841 bis 1849, in zweiter Bearbeitung als „Handbuch der Mineralchemie“ (1860; Suppl. bis 1895), „Handbuch der kristallographischen Chemie“ (1855) und „Handbuch der kristallographisch-physikalischen Chemie“ (1881). Ferner außer mehreren Leitfaden für die quantitative und qualitative chemische Analyse „Lehrbuch der Metallurgie“ (1856); „Grundriß der Chemie gemäß neuerer Ansichten“ (1881); „Chemische Abhandlungen 1838 bis 1888“ (1888).

Literatur. *Karl Friedrich Rammelsberg. Festschrift. Berlin 1887. — C. Voit. Nekrolog. München. Sitzungsberichte der Akademie* **30**, *2p.*

K. Spangenberg.

Rankine
William John Macquorn.

Geboren am 5. Juli 1820 in Edinburg, gestorben am 24. Dezember 1872 in Glasgow. Er studierte 1836 bis 1838 in Edinburg, bildete sich dann zum Ingenieur aus, vorwiegend in Irland, wurde Zivilingenieur und 1855 Professor der Mechanik und Ingenieurwissenschaften in Glasgow. Seine physikalischen Arbeiten beschäftigen sich mit der Wärmetheorie und dem Prinzip der Erhaltung der Kraft; die heutige Definition der Energie wurde 1853 von ihm eingeführt.

E. Drude.

Raoult
François Marie.

Geboren am 10. Mai 1830, in Fournès Nord, gestorben am 1. April 1901 in Grenoble. Er war zunächst Professor der Chemie am Lyceum zu Sens, siedelte 1867 in gleicher Eigenschaft an die Fakultät der Wissenschaften nach Grenoble über. Seine Arbeiten betreffen im besonderen die Thermochemie und Elektrochemie, er entdeckte das Gesetz der Schmelzpunktserniedrigung und das Siedepunktsgesetz von Lösungen und gab die nach ihm benannte Methode der Molekulargewichtsbestimmung an.

E. Drude.

Rapilli

= Lapilli, bezeichnet die erbsen- bis nußgroßen vulkanischen Auswürflinge (Bomben — Rapilli — Sand — Asche). Vgl. den Artikel „Vulkanismus“.

Rappakiwi

= Fauler Stein, ein bei uns als Findling vorkommender eigenartiger Granit finnischen Ursprungs, aus dem gewisse Feldspate unter Bildung von Löchern leicht herauswittern (Alexandersäule in Petersburg).

Raseneisenstein.

Vgl. die Artikel „Ortstein“ und „Mineral- und Gesteinsbildung (auf wäßrigem Wege)“.

Rassen und Rassenbildung.

1. Der Rassebegriff. 2. Rassenentstehung: a) Das Variieren des Menschen. b) Wirkungen der Umwelt. c) Auslese, Zucht, Domestikation. d) Rassenmischung. α) Vererbung bei Rassenkreuzung. β) Biologie der Bastarde. γ) Endergebnis der Rassenkreuzung. 3. Rassenverbreitung, -dauer und -untergang. 4. Rassen und Völker. 5. Rassenbeschreibung und Einteilung (Anthropographie): a) Rasseneinteilungen. b) Spezielle Rassenbeschreibung (Ueberblick).

1. Der Rassebegriff. Die Tatsache, daß der Mensch nicht in morphologisch einheitlicher Form auf der Erde lebt, daß seine körperliche Erscheinung stärker variiert als die fluktuierenden Variationen, die Einzelmerkmale einer sogenannten „guten“ Species, erhellt auf den ersten Blick. Wenn man etwa einen Eingeborenen der Guineaküste neben

einen schwedischen Bauern stellt oder auch nur einen friesischen Fischer mit einem süditalienischen vergleicht, sind stärkste Unterschiede auffällig, und ein zweiter Blick zeigt, daß es mehr als rein individuelle sind, sie kommen ganzen Gruppen zu. Daran ändert die Tatsache nichts, daß all diese Gruppen unscharfe Grenzen haben, daß sozusagen vermittelnde Individuen auftreten, daß oft im einzelnen Fall die Zugehörigkeit zu einer oder der anderen kleineren Gruppe völlig unentschieden bleiben muß. Die Frage, was diese menschlichen Gruppen darstellen, Arten, Unterarten, Varietäten, Rassen, ist viel erörtert, aber noch nicht gelöst worden, ist zum Teil ein Streit ums Wort. Das Wort „Rasse" für diese menschlichen Gruppen ist so alt eingewurzelt, daß es — mag man es auch mit Recht für wenig passend halten — nicht wohl ausgeschaltet werden kann.

Was ist nun eine Rasse, was bedeutet dieses Zerfallen in „Gruppen", eben in diese „Rassen"? Der Mensch ist ja nicht die einzige Form, die diese Erscheinung zeigt. Man wird sofort an die Haustiere und Kulturpflanzen denken mit ihren außerordentlich zahlreichen und bunten Rassen. Zum Teil sind diese allerdings sehr jungen Datums und völlig künstlich, mit Aufwand von vieler Technik willkürlich erzüchtet. Aber auch viele freilebende Säugetierarten (um uns auf diese zu beschränken) zerfallen in deutlich getrennte und differenzierte Formengruppen. So unterscheidet Lydekker bei einer sonst so isolierten, einseitig entwickelten und geographisch auf gewisse Teile des afrikanischen Kontinents beschränkten Form wie der Giraffe nicht weniger als 2 Arten und 10 Varietäten (Proc. Zool. Soc. London 1904) und Hilzheimer weist darauf hin, daß man z. B. bei der europäischen Waldmaus Mus sylvaticus 15 deutlich verschiedene Lokalformen auseinanderhalten kann und muß (Jahresh. d. Ver. f. Naturk. Württembergs, 67, 1911). Immer mehr kommen die Zoologen (und die Botaniker erst recht) dazu, die alten Linnéschen Arten als „Formenkreise" aufzufassen. Was man früher einheitliche Art nannte, wird jetzt als eine Formengruppe angesehen, die aus zahlreichen geographischen Lokalformen zusammengesetzt ist, die morphologisch deutlich verschieden und daher systematisch unterscheidbar sind. Als solche geographische Lokalformen des Formenkreises Mensch muß man sicher auch die menschlichen Rassen auffassen. Sie entsprechen jenen vollständig, auch die Merkmale, durch die sie sich voneinander unterscheiden, sind dieselben wie dort. Ob freilich auch die Unterschiede zwischen den ganz großen Rassengruppen, also etwa Mongolen und Negroiden (s. unten), die tiefer zu gehen scheinen, solche sind, oder ob hier etwa beginnender oder (wie manche Autoren meinen, s. unten) vollendeter Zerfall eines Genus in wirkliche Arten, das heißt in mehrere distinkte Formenkreise, vorliegt, ist noch strittig.

So ist es also wohl am richtigsten, die zahlreichen Einzelrassen — die vielen „Rassen im Duodezformat", wie man scherzhaft gesagt hat — als solche, zusammen einen Formenkreis (oder mehrere solche) bildende, geographische Lokalformen aufzufassen. Für diese Auffassung ist es dann im Prinzip gleichgültig, welche Faktoren diese Formen hervorgebracht haben (s. unten). Aus der Tatsache, daß scharfe Grenzen zwischen diesen Lokalformen nicht bestehen und auch gar nicht erwartet werden können, dann aus dem Umstand, daß wir einerseits diese Formen und andererseits auch die oben andeutungsweise erwähnten stärker differenten großen Gruppen mit demselben Namen „Rasse" bezeichnen, ergibt sich die Schwierigkeit, diesen Begriff eindeutig zu definieren. Diese Schwierigkeit liegt in der Natur der Sache; eine andere aber hat Unverstand verschuldet, nämlich die Meinung, daß diese zoologischen Formen des Homo in ihrer Abgrenzung irgend etwas zu tun hätten mit den Grenzen, die die Individuen Homo unter sich auf kultureller Basis errichtet haben, Grenzen, die Völker oder gar Staaten umschließen. So kam die heute noch allenthalben herrschende heillose Verwirrung der Begriffe „Rasse" und „Volk" (s. unten Abschnitt 4).

Definitionen des Begriffes Rasse sind mannigfach gegeben worden; es soll hier auf historische Uebersicht verzichtet werden, so sei nur angeführt, daß Topinard in seiner „Anthropologie" (1888), sich an Broca anschließend und wohl überhaupt die französische Schule repräsentierend, kurz und treffend sagt: „Les races sont des types héréditaires" und er fügt hinzu: „Ces types héréditaires sont d'ordre physique, physiologique ou pathologique...obéissant les uns et les autres aux mêmes lois générales d'hérédité." Dieser Definition ging die Erläuterung des Begriffes „type" voraus, als der Gesamtheit unterscheidbarer Merkmale. Topinard betont, wie dadurch auch in den Rassebegriff die Abstraktion kommt, wie er nichts real absolut fest Gegebenes ist, denn es ist willkürlich, wieviele Merkmale wir unterscheiden, wann wir einen „Typus" als gegeben anerkennen. — Von deutschen Autoren hat wohl Große in seiner gedankenreichen Schrift „Kunst und Rasse" (1900) die schärfste Definition gegeben, vor allem im Bestreben, „Rasse" und „Volk" begrifflich deutlich zu trennen. Große sagt: „Unter einer Rasse versteht die Anthro-

pologie eine größere Gruppe von Menschen, welche durch den hereditären Gemeinbesitz eines bestimmten angeborenen körperlichen und geistigen Habitus untereinander verbunden und von anderen derartigen Gruppen getrennt sind." Es ist dabei zu betonen, daß es sich also um erbliche Merkmale und nur um solche handelt, das ist in dieser Fassung deutlich gesagt (dabei werden wir im einzelnen Fall sehr oft nicht ohne weiteres sagen können, ob ein bestimmtes Gruppenmerkmal ein solches erbliches ist oder nicht). Die Frage, wieviele Merkmale oder wie eingreifende es sein müssen, um von solchem gemeinsamem Habitus (Topinards „type") zu sprechen und danach eine Rasse abzugrenzen, läßt auch diese Definition natürlich offen; auch nach ihr bezeichnen wir also z. B. so stark differente Gruppen wie Neger und Mongolen als zwei „Rassen", aber auch so nahestehende, wie etwa die nord- und südeuropäische. Solange man nicht die Entstehung der Gruppen kennt oder die wirkliche Bedeutung und Natur der „Merkmale" oder endlich heute noch nicht erreichbare Mittel hat, ihre verwandtschaftliche Stellung zu erkennen (etwa auf dem Gebiet der Serumuntersuchung), solange wird man diesen Mangel an Exaktheit mit in Kauf nehmen müssen, gerade wie wir es tun müssen hinsichtlich der Begriffe „Art" usw.

Die Merkmale nun, auf Grund deren wir die Rassengrenzen ziehen, werden meist kurzweg als „Rassenmerkmale" bezeichnet. Welche sind das? Nach der Definition müssen es vererbbare Merkmale sein; also alle, die durch unmittelbare Einflüsse der Umwelt bedingt sind, scheiden aus; sie müssen je einer größeren Gruppe von Menschen zukommen, so scheiden also auch die vererbbaren und vererbten Merkmale aus, die je ein oder mehrere Individuen und deren Aszendenten und Deszendenten charakterisieren (d. h. die „Linien"), also alle Familiencharaktere. Jedoch erhebt sich hier schon wieder die Schwierigkeit, daß es willkürlich ist, von „größeren Gruppen" zu sprechen und denen „einzelne Individuen" als Familie gegenüberzustellen. Man kann sich ganz gut denken, daß einige wenige Individuen, die bestimmte Familiencharaktere haben, sich und damit diese Merkmale so stark vermehren, daß sie einen Stamm, eine „größere Gruppe" darstellen, dann sind jene Familienmerkmale zu Rassenmerkmalen geworden. — Weiter müssen die Geschlechtsdifferenzen als solche beiseite bleiben (auch die primären und sekundären Geschlechtsmerkmale sind ja erbliche, größeren Gruppen zukommende Charaktere). — Endlich müssen die „Rassenmerkmale" möglichst wenig von der Umwelt beeinflußbar sein, sonst erkennen wir sie nicht und können sie nicht als solche gebrauchen: es sind natürlich trotzdem solche, gerade so gut wie sehr viele Merkmale, die wir überhaupt noch nicht oder nicht genügend kennen (z. B. viele Serumeigenschaften, Konstitutionseigenheiten, Hirnunterschiede usw.), aber wie gesagt, wir können sie nicht gebrauchen. Welche Eigenschaften allen diesen Anforderungen genügen, läßt sich von vornherein nicht sagen; sicherlich gibt es überhaupt keine, die z. B. völlig unabhängig sind von Umweltwirkungen; wir rechnen da aber mit gewissen Beträgen dadurch bedingter Abänderung und fassen sozusagen den Rest als rassenmäßig auf; aber vielleicht werden wir da manche heutige Ansicht noch einmal revidieren müssen (s. unten „Umweltwirkung"). So ergibt es sich also nur empirisch, was man als Rassenmerkmale für die Rassendiagnosen, für die Versuche, die Menschheit nach Rassen einzuteilen, annehmen und gebrauchen soll. Als die wichtigsten Rassenmerkmale haben sich folgende ergeben:

1. Die Haarform; 2. die Pigmentverhältnisse, also die Färbung von Haut, Haar und Iris; 3. die Schädelform, also die Form- und Größenverhältnisse der Gehirnkapsel, des Gesichtsskelettes und seiner Teile; 4. die Körpergröße und die Körperproportionen: 5. physiognomische Merkmale, worunter hier eine Anzahl morphologischer Sonderbildungen am Gesicht ziemlich willkürlich zusammengefaßt werden sollen, wie Nasenform, Lippenform, Form der Lidspalte usw. Die Aufzählung soll nicht die Reihenfolge der Wichtigkeit darstellen, und es mag betont werden, daß bald die einen, bald die anderen Merkmale für die Abgrenzung einer Rasse wichtiger sind, daß es kein Rassenmerkmal gibt, das völlig qualitativ eine Rasse abgrenzt. Es sind überall quantitative Unterschiede, stets müssen viele solche Unterschiede, also an vielen Merkmalen festgestellt sein, wenn wir von einer wirklichen Rasse sprechen wollen; für einzelne gibt es dann noch einige Merkmale, die hier nicht mit aufgeführt sind, wo nur die „wichtigsten" genannt werden sollten. Endlich ist es selbstverständlich, daß sich jederzeit neue „wichtigste", ja allerwichtigste noch finden lassen.

In einem gewissen Gegensatz dazu dedefiniert Ploetz (Arch. f. Rassen- u. Ges.-Biol., Bd I, 1904) den Rassebegriff, den er als „biologische Rasse" der Systemrasse gegenüberstellt. Biologische Rasse ist die Gesamtheit der „dauernden, sich erhaltenden und entwickelnden Lebenseinheit"; engere Zeugungskreise sind gemeint, die Unsicherheit der Herkunft der nur nach morphologischer Aehnlichkeit als einrassig bezeichneten Individuen soll wegfallen. In Wirklichkeit ist der Gegensatz eigentlich

nicht vorhanden, denn auch die systematische Gruppe will biologisch, genealogisch sein und wirklich gleiche morphologische Merkmale beruhen stets auf gleicher Abstammung.

2. Die Prozesse der Rassenbildung. Ueber Rassenbildung, Rassenentstehung und Rassenvergehen ist schon sehr viel geschrieben worden, besonders wird in jüngster Zeit viel darüber gehandelt — aber genau besehen, sind unsere Kenntnisse sehr gering. Die neuen experimentellen Errungenschaften der Zoologie und vor allem der Botanik haben da die Anthropologie vor zahlreiche neue Fragestellungen gebracht; sie haben vor allem gezeigt, daß sehr viele bisherige Annahmen recht willkürlich waren, daß wir ganz außerordentlich wenig wirklich sicher fundierte Tatsachen bezüglich der Vorgänge der Rassenentstehung oder Rassenumbildung usw. besitzen. Dadurch ist es zurzeit besonders mißlich, hier eine zusammenfassende Darstellung geben zu sollen — es ist alles sozusagen im Umbau und das (allerdings auch gründlich nötige) Abreißen war dabei rascher als das Aufbauen. — Aus der ungeheueren Literatur sollen im folgenden nicht viele Einzelheiten, noch weniger ein historischer Ueberblick über die Ergebnisse gebracht, sondern eine gedrängte Darstellung über diese versucht werden; es wird ein Blick geworfen auf die Entstehung der Rassen, auf deren Lebensäußerungen und endlich auf deren Untergang.

2a) Das Variieren. Es braucht hier nicht auseinandergesetzt zu werder, was man unter Variation, Mutation usw. versteht, welche Regeln wir über diese Erscheinungen kennen. Es genügt die Betonung, daß da alles, was für Tiere und Pflanzen festgestellt wurde, natürlich auch für den Menschen gilt. Da variieren also alle Merkmale nach bestimmten Gesetzen. Es besteht die nämliche Variabilität, ob man die Zahl der Zentimeter der vorkommenden Schädelbreite oder der vorhandenen Wirbel des Menschen oder der Hautleisten seiner Fingerbeeren, oder aber die Stacheln auf bestimmten Bezirken von Seeigeln oder die Fiederblättchen von Farnwedeln zählt. Da gibt es also anthropologisch nichts Besonderes, sondern nur die allgemeine Variabilität. Weiter existieren aber auch wie biologisch allgemein, so anthropologisch festgestellt, bestimmte „Erbeinheiten", die sich auf bestimmte Weise vererben (s. unter Mendelsche Regeln). Ebenso kommen anthropologisch wie zoologisch und botanisch von Zeit zu Zeit — oder einmal gehäuft, doch wissen wir darüber so gut wie nichts — erbbeständige neue Variationen vor (Mutationen vieler Autoren), die sich dann in Kreuzung kombinieren usw. — Also da besteht keine anthropologische Sonderbildung, so daß bezüglich aller Einzelheiten über Variation auf die zoologische und botanische Literatur verwiesen werden muß. — Vielleicht wurde es zuerst in der Anthropologie wünschenswert, die zahllosen Einzelbeobachtungen mathematisch zu bearbeiten, sehr bald hat man eingesehen, daß mit arithmetischen Mittelwerten und ähnlichen einfachen Ausdrücken nicht auszukommen ist. Aber bald haben sich die mathematischen Methoden der Anthropologie auch zoologisches und botanisches Arbeitsfeld erobert und jetzt übernimmt die Anthropologie wieder ihrerseits Methoden von dort. Es genüge hier festzustellen, daß man heute Variationsreihen anthropologischer Daten mit Hilfe dieser mathematischen Methoden bearbeiten muß, soll das Resultat modernen statistisch-biologischen Ansprüchen genügen. Man berechnet neben dem Mittelwert einer Reihe und deren Grenzwerten regelmäßig die sogenannte Standard-Abweichung, eventuell die mittlere Abweichung, jeweils deren wahrscheinlichen (oder mittleren) Fehler, man berechnet den Variationskoeffizienten und dessen Fehler, man bestimmt die Korrelation, die Typendifferenz usw., um nur die gebräuchlichsten zu nennen. Es ist das Verdienst von Karl Pearson und seiner Schule, hierfür eine Menge Formeln errechnet und das Verständnis der Natur des Variierens wesentlich vertieft zu haben (s. die verschiedenen Bände der „Biometrica", dann das Lehrbuch von Johannsen [1909]; von zahlreichen Einzelarbeiten sei nur der neuesten Formeln wegen Poniatowski, Archiv für Anthropologie 1911 genannt). Neben die Rechnung stellt sich die graphische Darstellung der Variation, vor allem mittels Variationskurven (s. Johannsen). Auf das Technische aller dieser Dinge kann hier ebensowenig eingegangen werden, wie auf Erörterungen über das Wesen der Variationen, ihre verschiedenen Arten, deszendenztheoretische Bedeutung (hierfür seien die Bücher von Baur, Goldschmidt, Haecker und Johannsen wärmstens empfohlen).

Aus dem Gebiete der Variationslehre genüge für die Frage der Rasseentstehung die Tatsache, daß wie alle Tiere so die Primaten und darunter der fertige Mensch in allen seinen Merkmalen variiert. Daraus folgt, daß das auch die betreffende Primatenform getan hat, welche sich zum Menschen entwickelte, also der werdende Mensch (s. den Artikel „Anthropogenese", Bd. 1, S. 480). Es bestand also von Anfang an Variabilität und, wir dürfen wohl annehmen, ziemlich starke, sonst wäre eben der Umwandlungsprozeß nicht durchführbar gewesen. Es sei dabei auf die prinzipielle Verschiedenheit von Lebenslagevariationen und Keimesvariatio-

nen, Mutationen nur hingewiesen, ihre Erörterung ist Sache der Deszendenztheorie, aber hier müssen wir die Annahme machen, daß eben unsere Form allmählich und sicher unter Verlust vieler sozusagen vergeblicher Versuche, d. h. aussterbender Seitenzweige, zahlreiche Keimesvariationen hervorbrachte. Aus deren Auslese (einerlei ob man natürliche Zuchtwahl oder direkte Lamarcksche Anpassung oder etwas anderes annimmt) entwickelte sich die menschliche Form. Es liegt sehr nahe, anzunehmen, daß da von Anfang an in Anpassung an lokale Verhältnisse sich stärkere Unterschiede innerhalb der erst werdenden, sozusagen noch bildsamen, noch nicht festgeprägten und angepaßten Art ausbildeten. Ob das direkte Anpassung oder indirekte durch Auslese bewirkte, bleibt für das Ende einerlei (die Unwahrscheinlichkeit der ersteren soll aber hier wenigstens ausgesprochen werden). Für diejenigen, die ein Zusammenfließen des Menschen aus mehreren primatoiden Wurzeln annehmen (s. den Artikel „Anthropogenese"), ist natürlich eine von Anfang an bestehende, noch stärkere Variabilität und Inkongruenz gegeben. Man darf also wohl auf Einigkeit rechnen in der Annahme, daß die Erscheinungen starker, erbkonstanter Variationen (Mutationen), die die Menschwerdung als solche zur Voraussetzung hat, auch den ersten Spaltungen innerhalb der werdenden Menschheit zugrunde lag, Spaltungen, d. h. Rassebildungen, die also einsetzten, ehe die Genese bis zu Ende gediehen war; weiter, daß dieselben Faktoren, die auf Grund jener Variationen die Umbildung von der betreffenden Primatenform zur Menschenform bewirkten, auch gleich einige Differenzen innerhalb der Menschenform hervorbrachten. — Wie weit zurück wir das Einsetzen dieses zweiten Prozesses in dem ersten annehmen müssen, läßt sich wohl heute nicht sagen; auch über die Zahl der größeren Spaltungen ist schwer Einsicht zu gewinnen. Diese so entstandenen ersten Spaltungen sind dann, wie leicht einzusehen, diejenigen, die heute noch am tiefsten gehen. Innerhalb der einzelnen dieser, sagen wir einmal Zweige, hat dann die weitere Rassenbildung eingesetzt bezw. je getrennt weitergewirkt, je ungleich energisch. Jene ersten tiefstgehenden Spaltungen sind dann wohl (abgesehen von etwaigen ausgestorbenen) die, die der Systematiker heute als Hauptgruppen oder Rassen I. Ordnung oder Unterarten oder gar eigene Arten ansieht (s. unten im Abschnitt 5).

Als wichtigstes ist also wohl festzuhalten, daß die Prozesse der Menschwerdung und der Rassenentstehung zunächst identische sind, aufs engste ineinandergreifen. Dagegen kann man die Frage aufwerfen, ob die kleineren Rassenunterschiede, also die zwischen einander nahestehenden Rassen oder Unterrassen oder Varietäten (wie man es nennen mag) ebenso entstanden sind wie jene, oder anders ausgedrückt, ob jene Faktoren auch auf den fertigen Menschen dauernd weiter eingewirkt haben oder noch einwirken. Aber noch ein zweites kommt hier dazu. Jene großen Gruppen unterscheiden sich so vielfältig, durch so deutliche, zahlreiche anatomische Merkmale, die derart den Charakter von scharfen zoologischen Gruppengrenzen tragen, daß wirklich alles dafür spricht, daß eben ihre Entstehung die gleiche war, wie die von Arten überhaupt. Dagegen handelt es sich bei den anderen um Unterschiede viel geringeren Grades und geringerer Zahl. Wenn zwei sogenannte „Rassen" sich etwa nur durch Farbe und Körpergröße unterscheiden, sind das wirklich Rassenunterschiede, oder nicht etwa nur Unterschiede durch äußere Einflüsse, geographische Verschiedenheiten, die dann also prinzipiell eine ganz andere Bedeutung hätten? So ist es am Platze, zunächst die Umweltwirkungen auf den Menschen zu erörtern.

2b) Wirkungen der Umwelt. Die Frage, welche Charaktere der vorhandenen Arten oder Unterarten oder auch Individuen durch direkte Wirkungen der Umwelt, und welche ohne diese rein durch Keimesanlage bedingt sind, steht in Zoologie und Botanik mitten in der Erörterung. Durch die modernen Kreuzungsexperimente und durch besondere, eigens zur Lösung dieser Frage angestellte Versuche weiß man heute, daß vor allem bei der Pflanze, aber auch beim Tier, eine Reihe scheinbarer morphologischer „Merkmale" keine erblichen Charaktere sind, sondern direkte Wirkungen der Umwelt. Ein Beispiel aus Baur (1911) soll das erläutern[1]): Eine normal rotblühende konstante rote Rasse der Primula siniensis rubra blüht, bei 30 bis 35° gehalten, weiß. Das vererbbare Merkmal dieser Pflanze ist nicht „rote Blütenfarbe", sondern die Fähigkeit, unter bestimmten Verhältnissen rot, unter bestimmten aber weiß zu blühen. Die beim Einzelindividuum zutage tretende wirkliche Farbe ist nur die auf Grund der (uns an sich verborgenen) Eigenschaft durch die zufällige Temperatur bewirkte „Modifikation". So ist die „Modifikation", die die gewöhnlichen Außenfaktoren bezüglich des Felles und des Schwanzes der Hausmaus hervorrufen, deren bekanntes gewöhnliches Aussehen. Heranwachsen in hoher feuchter Temperatur bringt dagegen Mäuse zustande, die längere Schwänze (und Ohren usw.) haben und viel lockereres Fell. Die wirkliche Eigenschaft, das vererbbare Merkmal des Felles ist also nicht die bekannte gleichmäßige Dichte, sondern die Fähigkeit, auf

[1]) Vgl. hier und bei den Zitaten im folgenden die Literatur am Schluß.

eine gegebene Wärme mit einer ganz bestimmten Dichte zu antworten; was wir für gewöhnlich sehen, ist nur die durch das gewöhnliche Klima aktivierte (daher häufigste) „Modifikation". Nun stehen die Biologen vor der Frage, wie die Merkmale der geographischen Unterarten einer freilebenden Formengruppe (die wir als Species bezeichnen) aufzufassen sind. Wenn wir, wie oben erwähnt, in Europa, geographisch bestimmt verteilt, ganz bestimmte differente Formen einer Species finden, sind das nun auch nur Modifikationen oder sind es wirklich erblich verschiedene Stämme, also etwa durch Zucht, je durch Ausmerzung der „anderen" entstanden? Diese Frage ist noch nicht einwandfrei gelöst, die modernere Richtung in der Zoologie neigt sich zur Annahme von „Modifikationen".

Auf den Menschen fanden diese neueren Gedankengänge bewußt noch keine Anwendung. Verfasser dieses hat im Anschluß an Bastardierungsfragen dieses ganze Problem aufgerollt (E. Fischer 1913). Aber vor langer Zeit schon hat Ranke die Frage: Erblichkeit oder Umweltwirkung für den Schädel aufs klarste in ihrer Wichtigkeit erkannt und erörtert (s. unten). Für den Menschen lautet also die Fragestellung entsprechend: Sind die anthropologischen Unterschiede, die wir z. B. in Europa sehen, etwa zum Teil nur Modifikationen? Wenn wir in irgendeiner Gegend, etwa Zentraleuropa, heute die überwiegende Mehrzahl der Bevölkerung brachycephal (rundschädelig) sehen und dabei nachweisen können, daß in diese Gegend einmal eine bedeutende Einwanderung langschädliger Elemente stattgefunden hat, erhebt sich die Frage: sind diese dolichocephalen Einwanderer in ihren Nachkommen ausgemerzt, ausgetilgt, so daß die brachycephale Rasse durch Auslese erhalten wurde (oder in der Vererbung sich durchsetzte) oder aber hat die Umwelt (irgendwelche Faktoren) die lange Form in die kurze „modifiziert"? sind es also noch reinrassig (relativ) dieselben, und sehen sie nur äußerlich anders aus? Der bisherigen Anthropologie wird fast schon die Fragestellung schier ungereimt erscheinen — und doch muß diese Frage in Angriff genommen, statistisch — an der Hand von beobachteten Tatsachen gelöst, nicht auf Grund von Spekulationen oder weil man sich den Modus und die Faktoren heute nicht gut „vorstellen" kann, abgelehnt werden. Daß es sich um ganz grundlegende Probleme handelt, ist klar.

Was weiß man nun von Umweltwirkungen auf den Menschen?

Der Begriff Umwelt ist hier außerordentlich weit zu fassen. Man darf da ganz gewiß nicht nur an Ernährungsverhältnisse und Klima im landläufigen Sinne der Worte denken. Schon alle Einflüsse des mütterlichen Organismus auf die wachsende Frucht gehören hierher; wir wissen gar nicht, ob und wie etwa Einflüsse, die bei der Mutter zu Kropf führen durch sie auf die Frucht wirken, um nur ein Beispiel zu nennen. Bei Klima darf man sich nicht nur Höhenlage, Temperatur-, Feuchtigkeits- und ähnliche Verhältnisse vorstellen, da gibt es noch eine Menge Faktoren die wir nicht ahnen. Man nimmt z. B. heute an, daß der Kropf an Wasser aus bestimmten geologischen Schichten gebunden ist; andererseits sieht man häufig Zusammenhänge zwischen Kropf und kretinistischer und oft zwerghafter Körperbildung, so daß also diese indirekt (unter anderem) sozusagen vom geologischen Bau des Untergrundes abhängen. Wenn es derartig, man möchte sagen, grobe und ins Pathologische gehende Wechselwirkungen gibt, sollten da feinere, chemisch-physikalischer Mittel sich bedienende Einflüsse dieser Umwelt etwa auf Knochenwachstum oder sogar bestimmtes Knochenwachstum unmöglich sein? Oder auch nur so ganz unwahrscheinlich, wo wir heute bestimmt wissen, daß das Knochenwachstum von bestimmten Drüsensäften regiert ist?

Umwelt sind weiter soziale Bedingungen, das will sagen, äußerst vielseitige und verschiedenartige Verhältnisse, entstehend aus der sozialen Sphäre des betreffenden Individuums und einzeln vielfach gar nicht analysierbar. So wissen wir z. B., daß die geschlechtliche Reife bei der Städterin früher eintritt als beim Landmädchen, eine Modifikation, die das Stadt- und Landleben verursacht, aber welche Faktoren es sind, darüber wissen wir gar nichts. Von einer Analyse der gesamten Umweltfaktoren sind wir also noch sehr, sehr weit entfernt!

Beobachtungen über die Wirkung von Umweltfaktoren auf den Menschen sind schon vor sehr langer Zeit gelegentlich gemacht, solche Wirkungen auch zur Erklärung bestimmter Formen herangezogen worden.

Am meisten hat das Problem bezüglich des menschlichen Schädels interessiert. Da sah man Formveränderung durch die Einwirkungen der Geburt, die allerdings wieder rasch ausgeglichen werden. Aber man kennt längst ähnliche und zwar willkürliche Einwirkungen — durch Binden und andere Mittel am Kind hervorgebracht —, die die Kopfform dauernd verändern, die künstlich deformierten Köpfe aus Peru, Bolivien, Florida usw. (s. den Artikel „Körperform des Menschen"). Man kennt die Mißstaltungen des Kopfes, die durch abnorme Nahtverknöcherung zustande kommen — man sah also Faktoren, die die Kopfform beeinflussen. Ranke hat nun schon in den 70er Jahren auf die zentraleuropäische „alpine" Brachycephalie aufmerksam gemacht. Er führt die Kurz-

köpfigkeit auf das Leben im Gebirge zurück; es braucht nicht oder nicht nur ein irgendwie gearteter direkter Einfluß zu sein, auch etwa die Kopfhaltung beim Gehen im Gebirge könnte, wie Ranke ausführt, hier wirksam sein. Daß Muskelwirkung auf die Knochen formgestaltend ist, haben mehrfache Untersuchungen dargetan. So hat Engel (1850) und dann, dessen Lehre ausgestaltend, Langer gezeigt, daß die Kaumuskeln die Form der Gesichtsknochen modeln; weiche Knochen — auf welchen Ernährungsverhältnissen Weichheit und Härte beruhen, wissen wir heute noch nicht — geben dabei leichter nach, die Gesichter werden lang, schmal. Neuerlich hat auch Nyström (1900) ähnliche Ausführungen publiziert, auf die gebückte Haltung hingewiesen, die Negerinnen täglich stundenlang beim Arbeiten einnehmen und auf die dabei wirksame Tätigkeit der Nackenmuskeln, dann auf die Körperhaltung von Reitervölkern. Es sind im ganzen die Gedankengänge Rankes. Dieser macht zur Stütze seiner vorhin erwähnten Ansicht von der Einwirkung des Gebirges vor allem auf die große Gleichheit der Schädelformen „in dem ganzen Zuge der europäischen Alpenländer" aufmerksam. „Obwohl stammverschieden, obwohl, seitdem die Geschichte von ihnen etwas berichtet und wohl ebenso vorher, vielfach gemischt ... ist trotzdem der Schädelbau im Gehirn- und Gesichtsschädel bei den Bewohnern der gesamten Alpenländer von größter typischer Aehnlichkeit: extreme Kurzköpfigkeit verbunden mit schmalem, langem Gesicht." — Das ist in der Tat auffällig — aber ein Beweis für die Wirkungen des Gebirges ist es nicht. Wir haben tatsächlich die Kurzköpfigkeit, aber sie ist in sich recht verschiedenartig, wie Toldt (1910) zeigt. Dann hat man darauf hingewiesen, daß andere Gebirgsgegenden Europas (Schottland, Skandinavien) keine Kurzköpfigkeit erzeugen. R. Virchow hat auf dasselbe Problem in Amerika hingedeutet, wo an bestimmten Orten die zeitlich aufeinanderfolgenden Schädelformen desselben Volkes wechseln, er betont die Wichtigkeit des Problems — es ist heute noch ebenso dunkel. In jüngster Zeit ist von zwei Seiten wieder daran gearbeitet worden: Walcher (1905, 1911) hat gezeigt, wie leicht beeinflußbar und wahrscheinlich dauernd beeinflußbar der Kinderschädel ist. Er legt Säuglinge teils auf harte, teils auf weiche Kopfkissen. Ins weiche Kissen sinkt der Kopf des in Rückenlage liegenden Kindes tief ein, erhält dadurch rechts und links Stütze und bleibt ohne Muskelanstrengung auf dem Hinterhaupt liegen. Die Betten derartig gelagerter Kinder stellt Walcher tief (niedrige Betten am Boden), damit die Kinder, auch wenn später das Interesse an der Außenwelt erwacht, von ihrer Rückenlage aus nach oben schauen müssen. Auf hartem Kissen sinkt der Kopf nicht ein; in Rückenlage hält ihn also nur Muskelwirkung auf dem rundvorragenden Hinterhaupt und bei geringer Ermüdung rollt er um und sinkt in Seitenlage. Diese Betten werden hochgestellt, so daß die Kinder bei Seitenlage des Kopfes durch das Gitter des Bettes herausschauen in die Stube. Andere Eingriffe werden vermieden. Und das Ergebnis ist eine hochgradige Veränderung der Kopfform. Der auf dem Hinterhaupt ruhende Kopf wird breit, mit Abflachung des Hinterhaupts, der in Seitenlage wird schmal und lang. Walcher vergleicht die kindlichen Köpfe mit denen der Eltern, noch überzeugender aber ist der Fall, in dem er zwei eineiige Zwillinge verschieden behandelt. Er berichtet dann über das Resultat aus der Zeit, wo die Kinder $2^1/_4$ Jahre alt geworden sind, wo also die „Behandlung" längst aufgehört hat, die Kopfindices sind 78,4 und 86,2! Es läßt sich gar nicht bestreiten, daß jene relativ einfachen Maßnahmen dauernd die Kopfform beeinflussen, ja es scheint sogar, daß als eine Art Korrelation auch die Gesichtsform beeinflußt wird.

Sind es hier einigermaßen bestimmte Einflüsse, die wirksam sind, so verfolgt Boas (1910 und 1911) unbekannte solche und glaubt sie sehr deutlich nachgewiesen zu haben. Er untersucht die Kinder von in Amerika eingewanderten Europäern und zwar solche von osteuropäischen Juden, welche brachycephal sind und solche von dolichocephalen Neapolitanern und Sizilianern. Die jüdischen Kinder, die in Amerika geboren werden, werden nun nicht so breitköpfig wie die Eltern und die italienischen nicht so schmalköpfig wie die ihrigen. Beide nähern sich einer mesocephalen, „amerikanischen" Form; je länger die Eltern vor der betreffenden Geburt im Lande sind, desto mehr. Es sind Veränderungen um 2 Indexeinheiten, die die Köpfe je in der betreffenden Richtung erleiden sollen. Dazu kommt ein Schwächerwerden der Italiener-, ein Bessergedeihen der Judenkinder! — Boas will Einflüsse der Lagerung der Kinder usw. ausschließen können. Auch an eingewanderten Schotten soll derselbe Vorgang festzustellen sein. Man darf die Möglichkeit nicht leugnen, immerhin wird man eine Bestätigung von anderer Seite und vielleicht anderem Orte abwarten sollen; die Boasschen Resultate beruhen auf Messungen einer ganzen Anzahl verschiedener Untersucher, so daß da doch Vorsicht und Zweifel geboten ist! — Radosavyerich (1911) greift soeben die Resultate stark an, hält die Methodik für völlig verfehlt und stellt jeden exakten Beweis für eine Veränderung in Abrede.

Daß auch andere Merkmale modifizierbar sind, ist vielfach festgestellt. So ist der Einfluß der Ernährung auf die Körpergröße sehr deutlich. Experimentell ist beim Hund festgestellt, daß von Geschwistern aus einem Wurf durch gute oder schlechte Ernährung dauernde sehr große Unterschiede in Größe und Körperbau erzielt werden können. — Beim Menschen bewirkt die reichere Kost in der Stadt ein rascheres Erreichen der definitiven Körpergröße und einen höheren Wuchs. Die europäische Bevölkerung ist nachweisbar seit etwa 50 Jahren erheblich größer geworden, z. B. der Holländer, nach Bolk (1910), um 10,9 cm im Mittel, die holländischen Juden um 6,3 cm! — welches die Gründe sind, ist schwer zu sagen. Boas (1895) zeigt, daß Indianer im Gebirge kleiner sind, als der Teil desselben Stammes, der in die Ebene überführt wurde. — Sicher nachweisbare Einflüsse auf die Farben des Menschen sind nicht beobachtet (wenn man von der direkten Sonnenbräunung, die wieder weggeht, absieht).

Auf die Wirkungen des Stadtlebens bezüglich Frühreife (auch früheres Sprießen des Bartes) wurde schon hingewiesen, Niceforo (1910) zeigt noch andere Einwirkungen der Umwelt auf physiologische Prozesse (stärkere Nervenreizbarkeit usw.).

Außer auf solche Einzelmerkmale wurde dann auch auf die Abänderung des ganzen Typus hingewiesen, doch kann man wohl sagen, es sind nur Hinweise, die eines statistisch-anthropologischen Beleges entbehren. So meint Fritsch (1899), daß sich im Laufe einer Generation, also in seiner langen Beobachtungszeit, von ihm direkt wahrgenommen, der ägyptische Typus verändert habe; Kollmann und Virchow erkennen die Richtigkeit davon nicht an. In der Tat kann jede Bevölkerungsverschiebung dasselbe Resultat vortäuschen. Ebenso spricht Ridgeway (1910) nur Ansichten, keine Beweise aus, wenn er sagt, der nordische blonde und der mediterrane dunkle Typus seien rassenmäßig völlig identisch, die mediterrane Umwelt modifiziere eben nur wie Tiere und Pflanzen, so den Menschen.

Im Gegensatz zu den wiedergegebenen Ansichten über Umweltwirkung stehen R. Virchow und vor allem Kollmann, der jede Möglichkeit einer Rassenveränderung leugnet (s. unten).

Man sieht, die Frage der Wirkungen der Umwelt ist noch völlig ungelöst, aber ihre außerordentliche Wichtigkeit für das Rasseproblem ist klar. Eine Lösung ist nur möglich durch Studium von familienanthropologischen Daten und von Kreuzungsergebnissen. Man muß die genealogischen „Linien" verfolgen und man muß bei Kreuzungen sehen, was erbliche Merkmale sind (vgl. Fischer 1913).

Hier muß dann kurz die Frage der Akklimatisation gestreift werden. Man kann darunter die Fähigkeit einer Rasse verstehen, sich irgendwelchen klimatischen Verhältnissen anzupassen, die gegen ihre ursprünglichen verschieden sind (also nicht etwa nur unsere Anpassung an die Tropen!). Man darf wohl annehmen, daß jede Rasse auf bestimmte klimatische Verhältnisse eingestellt ist, ihren Wärmehaushalt usw. danach gerichtet und sehr fein nuanciert hat. Aber der Körper hat auch die Fähigkeit, auf Aenderungen der Ansprüche zu reagieren, also sich neu einzustellen, neu anzupassen. Die Grenzen, bis zu welchen das gehen kann, sind vielleicht von Haus aus rassenmäßig verschieden, wahrscheinlich aber nur dadurch verschieden, daß die ursprüngliche Einstellung sehr wechselnd sein kann. Ist sie auf extreme Lagen eingerichtet (Polargegend, kalte feuchte Zone, heiße feuchte Tropen, tropische Trockenwüste), so wird sie sich an etwas gemäßigte Gegend schon, nicht aber an andere Extreme anpassen können. Dagegen wird ursprüngliche Anpassung an mittlere Verhältnisse wohl nach beiden Seiten leichter nachgeben können. Das alles sind theoretische Ueberlegungen, aber die wenigen Tatsachen, die wir kennen, stimmen damit überein. Zu einer wirklichen Bearbeitung und Lösung des Problems fehlt ungefähr noch alles (s. Referat Hutten-Czapski u. a. (1911)).

Kommt eine Rasse in ein Klima, wo sie sich nicht „anpassen" kann, so geht sie zugrunde: die Einzelindividuen werden hinfällig, körperliche und geistige Leistungsfähigkeit nimmt ab, der Körper büßt jede Widerstandskraft ein, so daß er jeder beliebigen accidentellen Krankheit leicht erliegt. Die Fortpflanzung nimmt ab, der Impetus dazu vielleicht, die Fruchtbarkeit sicher. So erlischt die Rasse an der betreffenden Stelle. Auf was es im Grunde beruht, welche Regulationen versagen, wissen wir nicht. Wieweit angepaßt die einzelnen Rassen an die einzelnen Oertlichkeiten sind, läßt sich sehr schwer sagen. Unsere heutige Technik kann natürlich auch manche Fährlichkeit beseitigen (Eingriffe in den Wärmehaushalt durch Kleidung, Hausbau, Kühlanlagen usw.). Dem Verfasser möchte scheinen, daß der Nordeuropäer an die Tropen überhaupt nicht anpaßbar ist; das Einzelindividuum kann künstlich dort gehalten werden, aber die Rasse gedeiht dort nicht; sie gedeiht schon in Südeuropa nicht. Der Südeuropäer hält Tropen viel besser aus. Hottentotten aus dem trockenen Südwestafrika, die nach dem großen Aufstand ins feuchte Kamerun versetzt wurden, gingen zugrunde. Chinesen scheinen sehr akklimatisationsfähig, ebenso Juden.

2c) Auslese, Zucht, Domestikation. Wenn die Umwelt das Einzelindividuum auch stark beeinflußt und einen Teil der Rassenmerkmale sozusagen verdeckt, ja wenn ein Teil der Merkmale, die wir als rassenmäßige auffassen nur Umweltwirkung zu verdanken, also keine erblichen „Merkmale", sondern „Modifikationen" wären, blieben doch noch eine ganze Anzahl wirklicher Unterschiede — teils Merkmale, teils Reaktionsweisen (auf die Umwelt) bestehen. Die wären durch Keimesvariationen (Mutationen) bedingt. Für die dürften wir Auslese und natürliche Züchtung annehmen. Daß natürliche Zuchtwahl, daß Ausmerzung vieler minderpassender Merkmale beim heutigen Menschen, vor allem bei Gruppen mit primitiver Kultur stattfindet, kann keinem Zweifel unterliegen. Bei diesen letzteren besteht bezüglich Nahrungserwerb, Fähigkeit, Märsche, Hitze, Durst, Hunger zu ertragen, Blutverlust, allerlei schwerverdauliche Nahrung, Krankheit auszuhalten, leicht und spontan zu gebären, zu stillen, im Besitze gesunder Glieder, scharfer normaler Sinne und genügender geistiger Fähigkeiten zu sein, ganz unstreitig eine dauernde scharfe Auslese, die in häufig wiederkehrenden Zeiten von Dürre, Wildseuchen, Kriegen usw. noch sehr verstärkt wird, nicht zum wenigsten für die Säuglinge und Kinder bezüglich kräftigster Konstitution. Da werden sicher „günstige" erbliche Varianten gezüchtet werden, sich ausbreiten, als Rassenmerkmale erscheinen. — Einzelheiten sollen hier übergangen werden, aber auf einen Punkt ist besonders hinzuweisen. Wenn man sich die Rassenunterschiede des Menschen ansieht, findet man vielfach, daß es morphologisch dieselben Bildungen sind, wie die Rassenunterschiede der Haustiere. Es wurde hin und wieder schon auf diese Tatsache kurz hingewiesen (Ranke, Hahn), eine eingehendere Bearbeitung fehlt; man könnte das Ganze, die Frage nach den Domestikationserscheinungen beim Menschen nennen. Schon Darwin (Variieren der Tiere und Pflanzen im Zustande der Domestikation) weist nach, daß domestizierte Tiere stärker zu variieren scheinen; unsere heutigen Kenntnisse erlauben da noch nicht viele Schlüsse, aber als wahrscheinlich muß angenommen werden, daß die veränderte Nahrung — qualitativ und quantitativ — Wärmeökonomie, Fortpflanzung (Häufigkeit, eventuell Zah der Aufzucht usw.) schon das Auftreten von Erbvarianten nach Zahl und Art beeinflussen kann. Vor allem möchte Verfasser darauf aufmerksam machen, daß das Integumentsystem (Haut, Unterhautfett, Haare, Federn, Hörner, Hautanhänge, Pigmentverhältnisse) besonders variabel zu werden scheint. Bei fast allen Haustieren finden wir Albinismus, Melanismus, Kräuselung, Lockung des Haares (Hund, Katze, Kaninchen, Meerschweinchen usw.) oder der Federn, Unter- und Ueberbehaarung — dann aber auch starke Differenzen der Körpergröße usw. Gerade das sind aber wichtigste und vielgestaltig ausgebildete menschliche Rassenmerkmale. Daß der Mensch — und zwar auch mit der primitivsten Kultur, die wir heute kennen — in einem Zustand lebt, der der Domestikation entspricht, scheint Verfasser sicher: Feuer, künstliche Decken und Hütten bringen künstliche Temperaturverhältnisse hervor und erlauben, Nahrungsvorräte aufzubewahren. Trotz des nicht geringen Kampfes ums Dasein bezüglich des Nahrungserwerbes wird die Nahrungsmenge (wenigstens in manchen Jahren) erheblich reicher sein, kraft der menschlichen Jagdmethoden und -geräte, als beim wildlebenden Tier. Endlich ist die Fortpflanzung überall willkürlich (Sitte, Gesetz) geregelt. Das aber sind die Charakteristika der Tierdomestikation. So erscheint der Schluß gerechtfertigt, daß Domestikationserscheinungen beim Menschen in Form zahlreicher und bunter Variationen auftreten und dann durch natürliche, stärker wohl durch mehr oder weniger bewußte sexuelle Zuchtwahl erhalten und auf eine Gruppe ausgebreitet werden. So ist Verfasser z. B. bezüglich der „weißen" (hellen) Haut und Blondheit nicht der allgemein herrschenden Ansicht, daß dieses Rassenmerkmal sich in natürlicher Anpassung an das nordische Klima gebildet habe. Hauschild hat nachgewiesen (vgl. den Artikel „Rassenmorphologie"), daß das Auge des blonden Nordeuropäers sich in der ganzen Pigmentverteilung anatomisch genau wie das von hellen domestizierten Tieren (Schwein) verhält, nicht etwa wie das von Polartieren. Verfasser glaubt, daß jener Pigmentverlust der blonden Rasse eine Domestikationsvariante ist, die sich allerdings nur im Norden (es braucht nicht etwa polar im Sinne von ewigem Eis zu sein) erhalten konnte, da die Tropensonne den pigment-ungeschützten Körper geschädigt hätte. Verfasser glaubt also, daß viele Rassenmerkmale zufolge der Domestikation auftraten, und zwar vielfach und an verschiedensten Stellen auftraten, gerade wie wir etwa ähnliche Lockenbildung, Blondheit oder Weiße selbständig bei verschiedensten Haustierarten sehen — daß aber beim Menschen jeweils nur einige solche Varianten sich halten konnten, die eben weder durch die Umwelt direkt modifizierbar noch so schädlich waren, daß sie der natürlichen Ausmerzung unterlagen. So dürfte der Domestikationszustand des Menschen (der etwa mit der Kunst der Feuererzeugung beginnt)

für die Ausbildung der (sekundären) Rassenmerkmale besonders wichtig sein.

Daß gewordene Rassen durch Aenderung der Umwelt unangepaßt geworden, gelegentlich auch untergegangen sind, ist wahrscheinlich. Andere werden sich durch Auslese abgeändert, also in andere verwandelt haben. Die prähistorischen Rassen, die wir auf Grund von Schädelform usw. annehmen, können beiden Arten als Zeugnis gelten, dagegen dürfte es schwer sein, zu entscheiden, welches der beiden Schicksale ihre Nachkommen hatten.

Endlich muß hier kurz die Inzucht genannt werden. Man führt allgemein Degeneration, wo sie nachweisbar, auf Inzucht zurück. Sie kann nach allen unseren Erfahrungen aus der Tierzucht diese Folgen doch wohl nur haben, wenn sie an sich kranke Stämme betrifft oder außerordentlich lang und intensiv betrieben wird. Mäßige Inzucht bei gesunden Stämmen ist sicher ohne jeden Schaden, wie Fischer am südwestafrikanischen Bastardvolk (s. den folgenden Abschnitt) nachwies, wo seit mehreren Generationen Verwandtenehen außerordentlich häufig sind und dabei das Volk bezüglich Gesundheitszustand und Vermehrung durchaus normal, ja vorzüglich ist. Pöch (Archiv für Rassen- u. Gesellschafts-Biol. 1908) weist auf Aehnliches in Neu Guinea hin, es wird das aber die Regel für viele kleinere Völkerstämme sein. Auf Einzelfälle wie Pitcairn, Loire-Inseln usw. soll nicht eingegangen werden (s. auch unten „Sozialanthropologie" über Familien).

2d) Rassenkreuzung. Die sämtlichen älteren Angaben und Untersuchungen über Rassenkreuzung des Menschen sind heute nur insoweit noch brauchbar, als sie Beobachtungstatsachen zuverlässig wiedergeben — und dies ist sehr wenig der Fall. Licht fiel auf das ganze Problem erst durch die Wiederentdeckung der Mendelschen Regeln und die tausende von Experimenten über Rassenkreuzung bei Pflanzen und Tieren.

Rassenkreuzung findet und fand beim Menschen in ungeheurem Grade statt. Ganz abgesehen von den Fällen, wo wir nur nach den als gemischt und gekreuzt anzusprechenden Merkmalen Kreuzung annehmen müssen, wie für die zentraleuropäischen Völker, für alle Malayen, ganz Nordafrika, Vorderasien usw., können wir Rassenkreuzung auch direkt, historisch, belegen. So entstanden seit den Zeiten der Negerimporte in Amerika zu tausenden Mischlinge; alle Grade von Mischung zwischen Europäer und Neger, Europäer und Indianer, Neger und Indianer gibt es da. Ebenso entstanden zahllose Mischlinge in Inselindien, in britisch Südafrika; zwischen Europäern und Eskimos in Grönland — kurz überall, wo sich Rassen berührten. In Amerika ist bekanntlich die Mischung so kompliziert geworden, daß man eine große Anzahl Namen hat, die Stufen zu benennen. Mischlinge von Weißem und Neger heißen Mulatten, von Weißem und Mulatten (meistens Mulattin): Terzeron (nämlich $^3/_4$ Weiß und $^1/_4$ Schwarz); von Weißem und Terzeron: Quarteron usw. bis Octavon. Der Quinteron ist fast ganz europäisch aussehend, galt in den Vereinigten Staaten als Weißer. Mischlinge zwischen Weißem und Indianer heißen in Nordamerika Mestizen, in Südamerika Cholo; Mischlinge von Neger und Indianer heißen Zambo oder Sambo oder Cafuso; Mischlinge zwischen Buren und Hottentotten in Südafrika heißen „Bastaards" oder „Bastards" (Deutsch-Südwest). Solche zwischen Weißen und Javaninen: Lip-lap usw. (Fruchtbarkeit s. unten).

Welches sind die Erscheinungen bei der Rassenkreuzung?

α) Vererbung[1]): Umfangreiches Material über die Vererbungserscheinungen an allen anthropologischen Merkmalen bei der Kreuzung zweier stark differenzierter Rassen liegt ausschließlich über die Bastards von Südwestafrika vor, die Verfasser monographisch bearbeitet hat (E. Fischer 1913); dann sind einzelne Merkmale (Haar, Farbe) für die europäischen Typen untersucht. Nur derartige Untersuchungen, wo die Merkmale einzeln geprüft und ihre Häufigkeit unter Bastarden bestimmter Eltern gezählt werden, geben uns wirklichen Aufschluß. Danach scheinen die menschlichen Rassen sich gerade so zu verhalten, wie die der modern geprüften Pflanzen- und Tiervarietäten, d. h. in weitestem Maße ihre Merkmale nach den Mendelschen Regeln zu vererben. Diese Vererbungserscheinungen interessieren zurzeit am meisten und in der Tat kann nur allein ihre Prüfung wirklich die Entscheidung bringen, was überhaupt Rassenmerkmal des Menschen ist. Diese Untersuchungen sind also von fundamentalster Bedeutung. Die bisherigen Ergebnisse sind folgende:

Die Haarform vererbt sich nach G. und C. Davenports (1908) Untersuchungen (78 Ehepaare mit 312 Kindern; Weiße) derart, daß gerades Haar rezessiv ist gegen krauses; die heterozygotische Form ist kraus oder lockig; bei lockigem Haar kann man stets Heterozygie annehmen. Die Dominanz des Kraushaares wird gelegentlich unterdrückt (Dominanzwechsel). E. Fischer (1913) konnte das bestätigen an den Buren-Hottentottenbastards Südwestafrikas, wo Bastarde bestimmter Grade, jeweils Eltern und Kinder in großer Zahl untersucht wurden (für alle

[1]) Vgl. für das Folgende die Artikel „Bastardierung" und „Vererbung".

Einzelheiten ist auf die sehr ausführliche Monographie zu verweisen). Dabei zeigte sich, daß bei der Kreuzung von schlicht und engkraus auch wellige Formen auftraten („herausmendelten", wie die Experimentatoren auf diesem Gebiet zu sagen pflegen). Fischer stellt die Vermutung auf, daß eine Erbeinheit „C" aus geradem Haar gebogenes (Curvatus) macht; gerades Haar ist also cc; eine zweite Einheit „S" macht dann diese Biegung, die als lockig, wellig, lockerkraus erscheint, zu einer richtigen Spiraltour. Eng spiraliges Haar (Negerhaar) wäre daher C.C.S.S. — Es dürften sich noch mehr „Faktoren" herausstellen.

Bean (1911) untersuchte dasselbe Problem bei chinesisch-tagalischen Mischlingen. Hier scheint die Straffheit des Mongolenhaares dominant zu sein; Bean hält das für einen Widerspruch mit Davenport, doch darf man wohl an die Möglichkeit denken, daß eben mongolisch-„straff" etwas anderes wie europäisch-„schlicht" ist. Dabei findet Bean einen festen Zusammenhang zwischen Haarform und Geschlecht, die Haarform des Vaters soll über die der Mutter vorherrschen — das bedarf aber sicher sehr der Nachprüfung.

Die Haarfarbe darf nach Davenports (1909) Untersuchungen aufgefaßt werden als bedingt durch eine ganze Reihe von Erbeinheiten. Vor allem scheinen Rot und Schwarz zwei an sich unabhängige Serien zu bilden. Rot ist dominant über „nicht rot". Die tieferen schwarzen Töne sind dominant über die lichteren. Eine genaue Angabe über die Erbeinheiten läßt sich nicht machen. Fischer kam etwa zum selben Resultat für die schwarzen und blonden Farben der „Bastards" (rot fehlte dort).

Die Hautfarbe, ebenfalls von Davenport (1910) untersucht, scheint bezüglich der einzelnen Rassen sich etwas different zu verhalten. Weiße untereinander haben wahrscheinlich mehrere Erbeinheiten, die sich so vererben, daß die eine „dunklere" Farbe bestimmend dominant ist über die helleren; ob es dabei deutlich markierte Stufen sind oder einander ganz naheliegende Schattierungen, steht nicht fest. Fischer konnte auch bei den Bastards nur feststellen, daß die Farbmerkmale „auseinanderfallen", also „mendeln", aber die Faktoren nicht genau analysieren, ja manches sprach sogar dafür, daß „Hell" dominant ist. — Ebenso ist das Verhalten der Hautfarbe bei Neger-Europäer-Mischung nicht klar; ja die Mulattenfrage ist bezüglich der Mendelschen Regeln die allerschwierigste, so daß Bateson die Mulatten als den einzigen Fall des sicher nachgewiesenen Nichtzutreffens dieser Regeln bezeichnet. Auch Pearson (1909) führt Zeugnisse dafür an, daß ein wirkliches Aufspalten, ein Wiederauftreten der europäischen reinen Merkmale bei Mulatten II. Grades sicher nicht vorkomme. In der Tat spricht sehr vieles für diese Ansicht, so daß dann der Neger sich gegen den Europäer anders verhielte als sonst Rassen gegeneinander — es wäre von prinzipiellster Bedeutung! — Davenports (1910) meinen dagegen auch für die Hautfarbe der Mulatten ein stufenweises Bestimmtsein durch Erbeinheiten, also eine Vererbung nach den Mendelschen Regeln annehmen zu dürfen. Die Mulattenfrage bedarf also noch sehr einer genauen Analyse.

Die Augenfarbe wurde von Hurst (1908) und von Davenports (1907) unabhängig und etwa mit denselben Ergebnissen geprüft. Besonders Hurst hat gezeigt, daß das Pigment in den vorderen Irisschichten bei der Vererbung als selbständiger Erbfaktor zur Iris ohne jenes dazukommt; er ist dominant. So sind dunkle Augen dominant über helle. Fischer bestätigt es für die Bastards.

An den südafrikanischen „Bastards" zeigt Fischer weiter, daß die Nasenform nach den Mendelschen Regeln sich vererbt. Wenn man sie mit dem Nasenindex (vgl. den Artikel „Rassenmorphologie": Nase) bestimmt, erkennt man, daß der niedrige Index, also schmale hohe Nase, dominant ist über den hohen; das ist deutlich nachweisbar. Die „gerade, schmale" (ohne Indexziffern bestimmt) ist dominant gegen die „niedere konkave".

Bezüglich der Nase hat dann Salaman (1911) gezeigt, daß die schmale stark gebogene Nase des sephardimschen Judentypus über die breite Nase dominant ist. Dagegen ist der askenassimsche (gröbere) Judentypus nach Salamans Meinung in toto rezessiv gegen den Gesichtstypus der nordischen Rasse (Engländer). Salaman faßte nicht die Einzelmerkmale des Gesichtes, sondern nur „semitischen" oder „nichtsemitischen" Typus. Da aber die Merkmale (wie unten auseinandergesetzt wird) nicht in Korrelation vererbt werden, wird man seine Untersuchung, die für die von ihm beobachtete F_1-Generation wohl stimmen wird, weiter ausbauen müssen.

Die Lidspaltenform fand Fischer bei den südafrikanischen Bastards ebenfalls „mendelnd" und zwar erwies sich die „gerade" Form dominant gegen die „schiefe".

Weiter ist die größere „relative Stirnbreite" dominant gegen die kleinere, die Indices zeigten das Aufspalten sehr deutlich. Von einer anderen Anzahl Merkmale: Körpergröße, Kopfform, Gesichtsform konnte Fischer zwar keine genauere Analyse der Erbeinheiten, des Dominanzcharakters usw. geben, wohl aber wenigstens ein Aufspalten, ein Nicht-Intermediär-Vererben sehr wahrscheinlich machen.

Weitere Untersuchungen über das Zutreffen der Mendelschen Regeln auf Rassenmerkmale fehlen, sie wären aber von allergrößter Bedeutung und dringend zu wünschen. Das Zutreffen der Regeln für viele andere Merkmale beim Menschen, individuelle und vor allem pathologische (Albinismus, Ueberzahl von Fingern und Zehen, allerlei Hemmungsmißbildungen, Konstitutionsanomalien usw.) kann hier nicht erörtert werden, es ist Sache des Pathologen, nicht des Anthropologen (man vergleiche die Lehrbücher der Pathologie, ferner die (zitierten) Bücher von Baur, Haecker, Goldschmidt usw. über Vererbung).

Aus allen diesen Nachweisen darf man wohl schließen, daß Rassenmerkmale des Menschen sich nach den Mendelschen Regeln vererben. Aber es ergeben sich noch sehr wichtige weitere Gesichtspunkte.

Wie bei Pflanze und Tier kann man auch beim Menschen nicht erkennen, ob eine ganz bestimmte Richtung oder Regel es bestimmt, welche Merkmale „dominant" sind. Bezüglich phylogenetischen Alters usw. sind wir da noch ganz im Ungewissen. Dagegen bekommt von diesen Ergebnissen aus eine viel erörterte Frage neues Licht und erfährt wohl ihre endgültige Lösung, die nach der sogenannten Präpotenz mancher Rassen. Man hält ganz allgemein einzelne Rassen bei Rassenkreuzung für erbstärker, für präpotent in der Vererbung; man sagt, sie, d. h. ihre Merkmale „schlagen durch", setzen sich durch, die andere Rasse unterliegt. So wird angenommen, daß wir Europäer geringere, eventuell „geschwächte" Vererbungskraft hätten gegen sogenannte Wilde. Man findet tatsächlich, daß nach Mischung, vor allem in den Tropen, bald manche europäische Merkmale wenig mehr hervortreten. So glaubt Boas bei nordamerikanischem Indianerhalbblut zeigen zu können, daß der alte zähe dunkle Indianertypus sich stärker durchsetze als der Kulturtypus des Europäers. Die Tatsachen sind oft richtig gesehen, aber die Erklärung ist falsch. Eine Präpotenz oder eine jeder Rasse dauernd oder abänderbar zukommende innere Vererbungskraft, die gegen die eine Rasse stärker, gegen die andere schwächer sich erweist, gibt es nicht. Niemals ist erwiesen, daß eine Rasse als solche sich stärker vererbt wie eine andere. Die Rasse als solche, der ganze Typus, das Rassenbild sozusagen, vererben sich überhaupt nicht! Was sich vererbt, sind ausschließlich die einzelnen Merkmale, die sogenannten Erbeinheiten. Das ist dem Botaniker und Zoologen schon selbstverständlich geworden (vgl. vor allem Baurs Lehrbuch). E. Fischer (1913) legt ausführlich dar, daß das auch für den Menschen gilt. Bei den „Bastards" in Südafrika ließ sich aufs deutlichste zeigen, daß nicht etwa die Hottentotten sich stärker durchsetzen in der Kreuzung als Europäer. Zum Nachweis eignet sich ganz besonders die sogenannte „Typendifferenz" (Mollisons), eine mit Hilfe bestimmter Formeln ausgerechnete Zahl, die angibt, wie stark das Mittel und die ganze Variationsbreite eines Typs vom anderen abweicht. Auch in Kurvenform läßt sich das sehr schön darstellen. Fischer konnte zeigen, daß reine Europäer und Hottentotten von der „Bastardbevölkerung" gleich weit abstehen, keine Stammrasse bevorzugt ist. — Es handelt sich nur um die Einzelmerkmale. Diejenigen Merkmale treten eben in den Bastarden gehäuft auf (genauer: treten zu 75% auf), die an sich dominant sind. Diejenige Rasse also, die viele an sich dominante Merkmale besitzt, wird gegen eine, die meist Merkmale an sich rezessiven Charakters trägt, in toto stark obzusiegen scheinen! Da die dunkleren Farben (schwarzes Haar, dunkle Augen usw.) im allgemeinen dominant sind, erscheinen häufig „Farbige" an sich „präpotent" gegen Weiße! Dieses „Scheinen" darf also künftig nicht mehr falsch aufgefaßt werden, wie bei Tier und Pflanze handelt es sich nur um dominante und rezessive Einzelmerkmale.

Die so verbreitete Annahme einer Rassenpräpotenz hat dann noch einen anderen Grund, einen psychischen. Der scheint vor allem wirksam zu sein bei der Ansicht, daß der jüdische Typus gegen den nichtjüdischen „durchschlage". Wenn wir bei entsprechenden Mischlingen auch nur ein oder das andere jüdische Einzelmerkmal wahrnehmen, sehen wir über die Merkmale der anderen (nordischen, alpinen) Rasse weg und sagen, die jüdische Rasse herrscht vor. Ferner übersehen wir beim Auseinanderfallen der Merkmale in der 2. Bastardgeneration die nichtjüdischen Typen als uns gewohnt leicht völlig und notieren uns die „herausmendelnden" jüdischen Typen als starke und deutliche Rückschläge, wir sagen, der jüdische Typus habe rein durchgeschlagen. Salamans Angaben zeigen deutlich, daß das nicht der Fall ist, auch wenn sie gründlicher Einzelarbeit zur Ergänzung bedürfen.

Die Frage, ob es individuelle Präpotenz gibt, ist etwas anderes und gehört nicht hierher. Immerhin soll gesagt werden, daß auch sie als besondere Eigenschaft oder physiologische Wirkung wohl nicht existiert. Die wohl zu beobachtenden Fälle individueller besonderer Vererbungsstärke dürften am einfachsten ebenfalls als Fälle von eigentümlichen Kombinationen vieler an sich „dominanter" „homozygotischer" Merkmale sich erklären.

Trotz der ausschließlichen Vererbung von Einzelmerkmalen bestünde eine Berechtigung, von Präpotenz ganzer Rassen zu sprechen dann, wenn die einer Rasse zu-

kommenden Merkmale in der Vererbung feste Korrelation aufwiesen. Dann wären Rassen mit vielen dominanten Merkmalen eben an sich sozusagen in toto dominant. Aber E. Fischer hat gezeigt, daß (wie es nach allen botanischen und zoologischen entsprechenden Ergebnissen zu erwarten war) keinerlei Correlation zwischen den anthropologischen Merkmalen von Bastarden besteht. Sowohl die Tabellen wie die Berechnung des Correlationskoeffizienten (s. den Artikel „Correlation") beweisen diese Tatsachen. Es darf wohl hier von den südafrikanischen Bastards aus verallgemeinert werden. Nur im Anfang des Entstehens einer Bastardbevölkerung werden viele Individuen auftreten, die je viele Merkmale einer Mutterrasse tragen, ebenso wenn Rückkreuzungen zwischen reiner Stammrasse und Mischlingen stattfindet — das ist leicht zu erklären, aber nicht als irgendwie organisch bedingte Korrelation aufzufassen.

Der Nachweis des Zutreffens der Mendelschen Regeln für die Rassenmerkmale des Menschen, vor allem für die von Fischer untersuchten Bastards zwischen zwei so differenten Rassen wie Europäer und Hottentotten wird noch für eine viel diskutierte Frage von Bedeutung, nämlich die nach der Bedeutung der Rassengrenzen. Ob die Rassen nur Varietäten, oder aber Unterarten oder gar Arten darstellen, hat man bisher vor allem durch den Hinweis auf die unbeschränkte Fruchtbarkeit der Rassen unter sich und die (oft als unbeschränkt angenommene, s. unten) Fruchtbarkeit der Bastarde unter sich entscheiden wollen. Im Tierreich findet bei Kreuzung zwischen Arten meist eine Beschränkung der Fruchtbarkeit statt. Man hat daher den Menschen als eine einzige Art angesehen. Aber es gibt Fälle, wo auch Tierarten und deren Bastarde dauernd fruchtbar untereinander sind (Hase und Kaninchen z. B.). Schon Broca hat deshalb jenen Schluß abgelehnt und mehrere Species der Menschheit angenommen; auf demselben Standpunkt steht heute Sergi (s. unten: „Systematik").

Für die Mendelschen Regeln lehrt nun die Erfahrung an Tier und Pflanze, daß sie fast nur auf Varietätenunterschiede sich beziehen, daß Artkreuzungen einen anderen Vererbungsmodus zeigen. Danach würde der Nachweis, daß für alle Rassenmerkmale bei allen Rassenkreuzungen des Menschen die Mendelschen Regeln zutreffen, ein ziemlich einwandfreier Beweis dafür sein, daß der Mensch heute als eine einzige Species anzusehen sei. Aber zu jenem Nachweis fehlen einerseits noch die Untersuchungen vieler Rassen ganz und dann spricht das wenige, was wir exakt über Mulatten wissen, noch nicht für völlige Gleichheit dieser Verhältnisse bei allen Rassen — so läßt sich die Frage heute noch nicht lösen.

β) Biologie der Bastardbevölkerungen. Wir wissen hierüber sehr wenig.

Die Fruchtbarkeit. Das Problem der Fruchtbarkeit von Bastarden ist sehr umstritten. Zunächst dürfte feststehen, daß alle Rassen miteinander fruchtbar sind und zwar scheint es, unbeschränkt und unvermindert fruchtbar. Aber schon dieses letztere ist etwas vorsichtig auszudrücken. Ueber Durchschnittskinderzahlen von rassenungleichen Paaren existieren noch lange nicht über alle häufigen Fälle Angaben, die soziale und andere Einflüsse ausschließen. Buren-Hottentotten-Mischung ist sehr fruchtbar, da dürften 7,7 Kinder der Durchschnitt sein (Fischer). — Als zweites steht wohl fest, daß alle Mischlinge mit ihren beiden elterlichen und mit anderen Rassen fruchtbar sind. So kann es also dann Mischlinge geben, die 3 und 4 Ahnenrassen haben (z. B. Neger-Europäer-Indianer). Ob diese Fortpflanzung zwischen Mischling und reiner Rasse beschränkt ist, ist unsicher, es scheint aber nicht (bei südafrikanischen Bastards sicher nicht). Endlich die Frage, ob Bastard mit Bastard und deren Kinder untereinander, also ob Mischlinge dauernd unter sich fruchtbar sind. E. Fischer zeigt, daß das für die Buren-Hottentottenbastards zutrifft und zwar unbeschränkt. Die Fruchtbarkeit, die dort Bastarde 4., 5. und 6. Grades untereinander aufweisen, ist eine ganz beträchtliche, gegen die Stammrassen keineswegs gemindert. Als Durchschnitt konnte eine Kinderzahl von 7,7 pro Ehe festgestellt werden! Aber da darf man doch wohl nicht ohne weiteres verallgemeinern. Mulatten unter sich scheinen nicht so fruchtbar zu sein. Mehrere Autoren, Wieth-Knudsen (1908), dann besonders Fehlinger (1911), machen auf die Minderfruchtbarkeit aufmerksam. Er verallgemeinert aber zu Unrecht auf alle Bastarde. Für manche, vor allem solche aus Nordeuropäer-Neger-Mischung scheint eine Minderfruchtbarkeit nachgewiesen. — Genaue Statistiken sind über diese Frage dringend nötig.

Neben einer Fruchtbarkeitshemmung scheint auch sonst Schwächung der Konstitution von Bastarden vorzukommen. Bei den südafrikanischen fehlt sie sicher, diese sind äußerst kräftig, gesund, ohne jedes Degenerationszeichen. Dagegen erwiesen sich Mulatten im Sezessionskrieg als hinfälliger, weniger leistungs- und gegen Anstrengungen, Blutverluste usw. weniger widerstandsfähig als reine Rassen (Fischers Ausführungen nach Tillinghast u. a.). Es hat sich gezeigt, daß diese Schädigung der Konstitutionskraft der Bastardnachkommen von Weißen und Negern verschieden groß

ist, je nachdem der weiße Ahn der „nordischen" oder der „mediterranen" Rasse Europas angehört. Die Blendlinge von Engländern mit Negerinnen zeugten unter sich ein stärker hinfälliges Geschlecht als die entsprechenden von Portugiesen und Spaniern. Das zeigte sich recht deutlich im englischen Jamaika im Gegensatz zum spanischen Haiti, Cuba, Porto Rico.

Auch eine Aenderung des Geschlechtsverhältnisses durch die Bastardierung wird angegeben. Für die südafrikanischen Bastards ist es sicher nicht der Fall; dort sind es (Fischer) 1076 Knaben auf 1000 Mädchen, bei reinen Buren etwa 1086 Knaben, also kein nennenswerter Unterschied. Man hat gelegentlich gemeint, aus den diesbezüglichen Veränderungen bei unehelichen (und als solche vielleicht mehr rassegemischten) Geburten auf eine Aenderung des Geschlechtsverhältnisses schließen zu können, die Angaben sind aber mehr wie unwahrscheinlich.

Abänderung von Merkmalen über die Grenzen der elterlichen Merkmale hinaus ist ebenfalls als direkte Folge des Bastardierungsvorganges aufgefaßt worden. Es würde einer Erscheinung entsprechen, die man bei Bastardpflanzen als Luxurieren bezeichnet. Boas hat (Zeitschrift für Ethnographie 1895) gezeigt, daß Europäer-Indianer-Mischlinge zu höherem Wuchse kommen als beide Stammrassen. Er erörtert die Umwelteinflüsse, vor allem die Ernährungsverhältnisse und glaubt sicher sagen zu können, daß jene Größenzunahme nicht durch sie bedingt sein könne. Ebenso fand E. Fischer bei den südafrikanischen Bastards, daß sie an Größe beide Elterntypen etwas übertreffen. Hagen (Kopf- und Gesichtstypen ostasiatischer und melanesischer Völker, Stuttgart 1906) stellte fest, daß bei Malayen-Tamilmischlingen, Malayen-Chinesen-Mischlingen und den Mischmalayen im ganzen sehr oft eine Verbreiterung des Kopfes und vor allem eine Verlängerung des Gesichts über die elterlichen Typen hinaus stattfindet. E. Fischer bestätigt die Gesichtsverlängerung bei den „Bastards". Irgendeine Erklärung steht aus, die Verhältnisse bedürfen dringend der Nachuntersuchung.

Endlich wird ein besonderes Verhalten der geistigen Eigenschaften bei Mischlingen fast ganz allgemein angenommen. Mischlinge seien geistig in fast allem schlechter als beide Elternrassen. Diese Ansicht erfährt ihre Stütze nur in den Erfahrungen, die man mit Halbblut gemacht hat, das als Proletariat in den Minenstädten, Hafenplätzen, Großstädten als rassenanatomisch undefinierbare Masse lebt. Man vergißt den sozialen Einfluß ganz und schiebt alles der Mischnatur zu. Wohl scheint es recht plausibel, daß auch geistige Merkmale „mendeln", also ohne Korrelation sich einzeln vererben und daß dadurch recht disharmonische geistige Merkmalskomplexe, also psychische Anlagen, entstehen. Aber als Regel kann das nicht angenommen werden. Ebenso werden auch auffällig günstige Kombinationen keine Regel sein, aber sie kommen vor, wofür Booker Washington und andere moderne „Führer" der Negerbewegung — es sind stets Mischlinge — als Beispiele dienen. Die Masse der Mischlinge werden auch hinsichtlich der geistigen Anlage sich im allgemeinen eben deutlich als Mischung von beiden Rassen erweisen, nicht schlechter und nicht besser, so konnten das die Beobachtungen von E. Fischer am geistigen Leben, an der gesamten Kultur der „Bastards" in Südwestafrika deutlich nachweisen.

γ) Endergebnis von Rassenkreuzungen. Eine für das Verständnis und die Beurteilung so vieler heutigen anthropologischen Gruppen besonders wichtige Frage ist die nach dem endgültigen Ergebnis, das Rassekreuzungen zeitigen. Entsteht eine neue Rasse? eine Mischrasse, mit mittleren, oder neuen Charakteren? Oder schlägt eine Rasse mehr oder weniger durch? Die letztere Frage ist — soweit es sich dabei nur um Vererbung handelt — schon oben beantwortet worden. Auf die erstere antworten zunächst wieder Tausende von Bastardierungsexperimenten der Botaniker und Zoologen (s. Baurs Lehrbuch), daß keine „neue" Rasse zu erwarten ist: dauernd spalten die Merkmale wieder nach der Mendelschen Regel auseinander, dauernd trifft man die Einzelmerkmale in tausendfältiger Kombination nebeneinander, dauernd gleicht die Gesamtbevölkerung einer sogenannten F_2-Generation, also in der prozentualen Häufigkeit für jedes Merkmal der Enkelgeneration reinrassiger Stammeltern. Dabei ist allerdings strengste Voraussetzung, daß keine Auslese, keine Bevorzugung bestimmter Merkmale oder Benachteiligung, daß also rein panmiktische Vermehrung stattfindet. Beim Menschen ist es ganz gewiß nicht anders. Vor langen Generationen sind in Zentraleuropa Blonde eingewandert, dauernd fand die intensivste Mischung statt, aber es ist nicht ein gleichmäßiges mittleres Braun entstanden, heute noch sind Blonde neben den anderen da und in sehr erheblicher Menge. Die Merkmale halten sich, eine immer unübersehbarere Menge von Kombinationen entsteht, aber keine neue Rasse. E. Fischer zeigt — allerdings nur für 5 bis 6 Generationen dauernde Bastardierung — in Südafrika genau dasselbe. v. Luschan (1889) hat auf den Vorgang zuerst aufmerksam gemacht, er führte aus, wie immer wieder die alten Typen auftreten, die vor Jahr-

tausenden schon im Lande waren, die Rassenmischung führt, wie er es nennt, zu einer „Entmischung". Heute, wo man die Mendelsche Spaltung kennt, ist das ohne weiteres verständlich.

Dieses Auseinanderfallen bezw. Bestehenbleiben der alten Merkmale wird nun besonders dann von Bedeutung sein, wenn nicht, wie vorhin als Bedingung genannt, eine panmiktische Vermehrung stattfindet, sondern wenn Auslesevorgänge eingreifen (s. unten).

3. Rassenverbreitung, -dauer und -untergang. Von der Stätte, da die Menschheit entstand (vgl. den Artikel „Anthropogenie", Bd. I, S. 482) und je von der, da die einzelnen Rassen ihre Sonderbildung erfuhren, haben sich diese verschieden stark ausgebreitet. Im Anschluß an die alte Wagnersche Migrationstheorie sprechen Fritsch und Stratz von Wandervölkern oder aktiven Rassen und von Standvölkern oder passiven (seßhaften) Rassen. Das ist stark schematisiert, aber nicht ohne einen wahren Kern. — Die Verbreitung brachte dann an den Verbreitungsgrenzen Mischung mit sich, so daß man eine große Mischzone zwischen den europäischen und mongolischen und den europäischen und negroiden Rassengruppen hat. — Völkerwanderungen gab es dann, nachdem längst die heutigen Rassen gebildet waren, schon in frühesten prähistorischen Zeiten — sie dauerten von dort an bis heute, von Zeit zu Zeit gewaltig anschwellend, wie die große Germanenwanderung in Europa, die Bantuwanderung in Afrika, heute im wesentlichen fast lautlos vor sich gehend, wie die Binnenwanderungen in Europa (Polen, Italiener) und die „Auswanderungen" über See. — So sitzen heute Bevölkerungen, aus bestimmten Rassen zusammengesetzt, weit ab von ihrer rassenmäßigen Heimat, die Europäer und Ostasiaten in Amerika, in Australien, in Südafrika usw. (s. unten 5a „Rasseneinteilung"). Was die Größe der Rassen, also deren Kopfzahl anlangt, so kann man nur aus den Ziffern, die die Zählungen und Schätzungen der Völker ergeben, einige Schlüsse ziehen, da sich ja Rassen- und Völkergrenzen auf keine Weise decken. Es dürften etwa 500—600 Millionen Mongolen sein, 600—700 Millionen Europäer, d. h. Individuen der das Gros der europäischen Bevölkerung zusammensetzenden 4 Rassen, 100—120 der negroiden Gruppe Afrikas, um nur die drei großen zu nennen — aber es sind nur ganz ungefähre Ziffern!

Die Dauer, d. h. das physiologische Alter der Rasse dürfte unbegrenzt sein, ihr Tod ist ein unnatürlicher. Dagegen wird sie nicht immer als dieselbe dauern müssen, es sind Umänderungen (Anpassungen) denkbar, vor allem durch Neuauftreten mendelnder Merkmale verbunden mit Ausmerzung bestimmter Merkmale. Ob und wie oft das geschah, entzieht sich jeder Berechnung. Für die kurze Spanne Zeit, da wir überhaupt etwas vom heutigen Menschen wissen, muß er wie alle heutigen Säugetierformen als konstant angesehen werden. Kollmann (l. c.) hat mit größter Konsequenz diese Konstanztheorie verfochten. Seine Lehre, daß seit dem Diluvium der Mensch in bestimmte Rassen zerfallen ist und diese sich als „Dauertypen" erhalten haben, oder besser die „Merkmale" sich dauernd erhalten haben, daß auch Mischung da nichts ändern kann und die Umwelt ebenfalls nichts, gewinnt aus den Ergebnissen der Mendelschen Vererbungslehre neue Stützen. Oben wurde gezeigt, daß die „Merkmale" sich selbständig in aller Mischung erhalten.

Wenn man nun trotz aller nachweisbaren Einwanderungen auch am selben Ort dauernd durch die Jahrtausende eine Konstanz der Rasse nachweisen kann, so sind dafür nur zwei Erklärungen denkbar: eine gewaltige Wirkung der betreffenden lokalen Umwelt, die alle fremden Einwanderer der alten bodenständigen Bevölkerung gleichmacht; die Konstanz der Rasse wäre dann nur scheinbar. Oder aber: aus der Mischung und Rassenkreuzung, die der Einwanderung einer fremden Rasse folgt, wird diese durch irgendwelche Prozesse wieder ausgemerzt. — Verschmelzung zu einer neuen Rasse gibt es ja nicht, beider Rassen Merkmale bestehen solange nebeneinander bis die Träger der einen Rasse ausgetilgt sind. Man könnte statt von Entmischung in diesem Falle von „Restitution der alten Rasse" sprechen. Die Ausmerzung ist zu erklären einmal als natürliche: die neue Rasse ist an das Klima usw. weniger angepaßt, ihre Fruchtbarkeit, Lebenskraft usw. leidet. Das müßte gleich im Anfang nach der Mischung geschehen, solange es noch viele Individuen gibt, die gleichzeitig viele Merkmale derselben Rasse tragen. Solche Faktoren dürften zum Teil den Untergang der „nordischen" Rasse in den südlichen Völkern (Südeuropa, Indien) bewirkt haben. Dann kommt die „soziale Auslese" hinzu (vgl. den Artikel „Sozialanthropologie"). Wenn die eine Rasse Träger bestimmter sozialer Schichten oder Gruppen ist, kann sie durch soziale Faktoren dezimiert werden (Fortpflanzungsbeschränkung, Ausrottung durch Kriege usw.). Sehr oft werden beide Arten der Ausmerzung wirksam sein. — Ob in Wirklichkeit in den Fällen, wo wir Rassenkonstanz sehen, öfter eine Angleichung durch die Umwelt oder öfter eine Restitution der alten Rasse, oder ob beides sich kombinierend besteht — darüber kann ein Urteil noch nicht abgegeben werden.

Der letztgenannte Modus, die Ausmerzung durch „soziale Auslese“, kann also eine Rasse (aus der Mischung) austilgen; ebenso kann sie ausgetilgt werden, wenn sie in klimatische Verhältnisse kommt, die ihre Akklimatisationsfähigkeit überschreiten. Derartige sozusagen gewaltsame Eingriffe können also zum Rassetod führen. Man spricht oft von ausgestorbenen (prähistorischen) Rassen; ob sie das sind, ob ganze Rassen ausgestorben sind, ist nicht bewiesen. Sie könnten unter Aenderung (Modifikation durch die Umwelt — oder diluviale Rassen etwa durch allmähliche Abänderung durch Auslese) heute noch leben, wenigstens in einzelnen Zweigen. Endlich wäre noch die Vernichtung einer Rasse durch direkte Eingriffe einer anderen zu erwähnen: Ausrottung durch Kriege, Ueberbringen von Krankheiten, Alkohol, Entziehung der ihr notwendigen Lebensweise usw.

4. Rassen und Völker. Die Erörterung der Beziehungen von Rasse und Volk hat in letzter Zeit großen Umfang angenommen. Das meiste davon fällt unter den Begriff „Sozialanthropologie“ (s. den Artikel „Sozialanthropologie“). Hier soll bei der Besprechung des „Rassebegriffes“ nur noch einmal betont werden, daß Rasse und Volk zwei grundverschiedene Dinge sind. Völker sind (wieder nach Große, s. oben S. 79) Gruppen von Menschen mit Gemeinsamkeit erworbener Kulturgüter. In konsequenter Weise muß dafür eingetreten werden, daß man diese Begriffe auseinanderhält, auch in den Benennungen. Die Grenzen decken sich fast nie. Viele Völker können durch Sprache und sonstige Kultur verwandt sein, zusammengehören, sie brauchen absolut keinen Rassenzusammenhang zu haben. Lebende Träger einer Sprache, einer Kultur, also Vertreter eines Volkes — Menschen, die natürlich irgend einer Rasse angehören — bringen diese Kulturgüter einem anderen Volke — friedlich oder kriegerisch — einem Volke, dessen Individuen ein oder mehreren ganz anderen Rassen angehören können — und können dann selber ausgetilgt werden, körperlich restlos. Dann hat ihr ursprüngliches Volk und das, in dem sie untergingen, dieselbe Sprache — aber körperlich keine Spur von Verwandtschaft. So gibt es indogermanische, arische Sprachen — aber keine solche Rassen; wenn Sizilianer oder Portugiesen und andererseits Schweden indogermanische Sprachen reden, sind sie deshalb rassenmäßig nicht verwandt. Von den Ungarn als einem Stück mongolischer Rasse zu sprechen, weil sie eine Sprache aus dem mongolischen Sprachkreis sprechen, ist Unsinn, sie sind rassenmäßig dasselbe wie ihre Nachbarn. Slavische Rasse, keltische Rundschädeligkeit usw. ist ebenso unsinnig wie dolichocephales Italienisch oder blondes Russisch! — (wie sich ungefähr Martin gelegentlich ausdrückte).

Und trotzdem bleibt ein bedeutsamer Zusammenhang zwischen Rasse und Volk. Die meisten Autoren nehmen an, daß jeder Rasse wie bestimmte körperliche so auch ganz bestimmte geistige Anlagen zukommen. Auch diese sind modifizierbar, ihre Entfaltung usw. ist umweltbedingt, aber die Anlage ist rassenmäßig angeboren. Von dieser Anlage der ein Volk zusammensetzenden Rassen — die meisten Kulturvölker werden mehrere Rassenkomponenten in sich bergen — hängt zum guten Teil die geistige Leistungsfähigkeit des betreffenden Volkes ab — und damit zum Teil sein Schicksal. Diese Zusammenhänge studiert die „Sozialanthropologie“; Versuche, sie willkürlich zu beeinflussen, die „Rassenhygiene“ (vgl. den Artikel „Sozialanthropologie“).

5. Rassenbeschreibung und Einteilung, Anthropographie. Die „Anthropographie“ (Martin; s. das im Artikel „Anthropologie“ Gesagte, Bd. I, S. 484) unternimmt es, die einzelnen menschlichen Gruppen systematisch deskriptiv zu behandeln; sie liefert also Beschreibungen, sozusagen Monographien der einzelnen Rassen, bezw. der Rassengemische der einzelnen Bevölkerungsgruppen (Stämme, Völker). Sie hat aber weiter diese Ergebnisse dann zu vergleichen, die Bilder, die sie entwirft und gewinnt, zu gruppieren; dadurch soll versucht werden, die genealogische gegenseitige Stellung der Rassen zu erkennen und so eine auf Verwandtschaftsbeziehungen beruhende Systematik der menschlichen Rassen zu erhalten.

Aber von diesem Endziel ist die Anthropographie noch himmelweit entfernt, ja es fehlen ihr dazu trotz der unglaublich angewachsenen Literatur, insofern noch erste Voraussetzungen, als wir erst von ganz wenigen Gruppen wirkliche wissenschaftliche und erschöpfende Monographien haben.

Von jeder einzelnen ethnischen Gruppe ist auf Grund eingehenden Studiums eine „Anthropographie“ nötig. Dazu müssen genügend viele Individuen — der verschiedenen Altersstufen und beiderlei Geschlechts — mit allen anthropologischen Methoden untersucht werden (deskriptiv, metrisch, bezüglich Physiologie, Pathologie, anatomisch am toten Material). — Als Muster seien die Untersuchungen der Wedda durch P. und F. Sarasin oder der Senoi und Semang durch Martin genannt. Da tatsächlich nur Stämme und Völker gegeben sind, wird erst die Durchuntersuchung zahlreicher solcher Einheiten Aufschluß über eine etwa auf viele solcher ausgedehnte Rasse geben, und da sehr oft — bei Kultur-

völkern darf man sagen stets — in solchen ethnischen Einheiten Rassengemische vorliegen, wird man nicht Rassen, sondern die Rassenmerkmale in Völkern objektiv wiedergeben müssen, und erst auf dieser Basis kann der Versuch einsetzen, aus Merkmalkombinationen die ursprünglich zugrunde liegenden Rassen zu rekonstruieren.

Daß die „Ergologie", d. h. das Studium der absichtlichen und unabsichtlichen Produkte der geistigen Tätigkeit menschlicher Gruppen, nicht gleichgültig ist für die Anthropologie, sei besonders betont (vgl. oben und den Artikel „Sozialanthropologie") — geben doch viele ergologische Momente, Sprache z. B., außerordentlich wichtige Hinweise auf Zusammenhänge. Aber die Versuche, eine wirkliche Rassensystematik aufzustellen, müssen prinzipiell auf somatische Merkmale aufgebaut sein; sie müssen natürlich (wenn einmal eine solche klargestellt ist) geistige Veranlagung mit berücksichtigen (ein Stück Physiologie), keinesfalls aber einzelne Kulturgüter, wie Sprache oder dgl. — Es mag sein, daß man von diesem strengen Standpunkt aus heute noch sehr viele Gruppen gar nicht einreihen, viele nicht einmal eindeutig benennen kann — dann hat eben hier die Arbeit einzusetzen —, aber das Verfahren ist konsequent und das einzig richtige.

Für eine Gruppe von Fällen ist die deskriptive Anthropographie genötigt, von ihren eben angedeuteten hohen Ansprüchen an die Bearbeitung zurückzugehen und sich mit weniger zu begnügen: für Rassen der Vergangenheit, vor allem für prähistorische. Selbstverständlich sind auch sie anthropographisch zu bearbeiten. Meist wird man da auf Skelettmaterial angewiesen sein; gelegentlich kommt Weichteilmaterial (Haare, mumifizierte Gebilde) dazu; dann kommen aber hier und da Abformungen (Abdrücke) in Betracht und in nicht ganz geringem Maße Angaben über sie von früheren Augenzeugen, als da sind Beschreibungen, Abbildungen, plastische Darstellungen; all das ist anthropographisch verwertbar, sofern die nötige Kritik — da es eben auf Angaben anderer beruht — einsetzt. — Stets wird die Anthropographie früherer ethnischer Gruppen und Rekonstruktion früherer Rassen lückenhaft bleiben.

Der letzte Schritt ist dann natürlich der Versuch, die heutigen Rassen auf frühere zurückzuführen. Dieser Versuch ist in letzter Zeit mehrfach unternommen worden, das Material dazu, prähistorische Funde, sind gerade in letzter Zeit in gewaltiger Menge zugeflossen (s. unten 5b: „Europa" und den Artikel „Fossile Hominiden").

Es ist ganz unmöglich und kann auch gar nicht die Aufgabe dieses Handbuches sein, hier aus den Einzelarbeiten solche Monographien zu bringen, es soll hier auf Rassebeschreibungen fast ganz verzichtet werden; sie sind in den verbreiteten unten genannten Werken leicht nachzusehen. Hier kann lediglich auf die Probleme als solche hingewiesen werden, die sich dabei erheben, gezeigt werden, wie weit (oder besser, wie wenig weit) wir heute sind, und zwar soll zuerst ein Ueberblick gegeben werden über die Versuche der Rasseneinteilung des Menschen („Klassifizierung" der Menschenrassen, „Rassensysteme") und dann soll über einige Probleme der speziellen Anthropographie eine kurze Uebersicht folgen.

5a) Rasseneinteilungen. Man ist heute noch nicht in der Lage, eine Einteilung der Menschheit zu geben, die auf morphologisch-physiologische Merkmale aufgebaut, wirklich eine Gruppierung der menschlichen Varietäten nach genealogischen (stammesgeschichtlichen) Gesichtspunkten ergäbe. Ueber die Stellung sehr vieler kleiner Gruppen wissen wir noch nichts. Ueberblickt man die Einteilungsversuche, so erkennt man, daß einige große Gruppen, allerdings auch mit gewissen Modifikationen anerkannt sind. Dabei hängt es von der Stellung ab, die der betreffende Autor zum Problem der Menschwerdung einnimmt (vgl. den Artikel „Anthropogenese", Bd. I, S. 475), ob er diese größeren Abteilungen als Arten, Unterarten, Rassen bezeichnet. Ebenso herrscht bezüglich der Nomenklatur ein geradezu trostloses Durcheinander. Aus der Zeit, da zwischen Völkern und Rassen noch kein Unterschied gemacht wurde, stammen eine Menge Benennungen, die unterschiedslos für beides benützt werden. Eine Nomenklatur der Rassen ist im ganzen noch zu schaffen. Ernstlich und zuerst versucht wurde eine solche Nomenklatur von Wilser (1911), vor allem für prähistorische Rassen, konsequent durchgeführt (wenn auch mit recht wenig glücklich gewählten Namen) ist eine für alle Rassen von Sergi (1911). Eine Rassennomenklatur muß Völkernamen vermeiden (also arisch, indogermanisch, semitisch, hamitisch, Bantu, Sudan usw.), neu geschaffene oder zu schaffende Namen müssen, genau wie in Zoologie oder Botanik, auf die geographische Verteilung oder auf einzelne morphologische oder physiologische Merkmale Bezug nehmen, so sind die Namen: dinarische, alpine Rasse, afer, xanthochroische usw. richtig gebildet.

Von den Einteilungsversuchen sollen die wichtigsten kurz charakterisiert werden. Es können darin drei Richtungen unterschieden werden: 1. solche, die neben morphologischen Merkmalen auch kulturelle heranziehen, vor allem die Sprache; das sind also keine Rassen-, sondern Rassen- und Völkerein-

teilungen; 2. reine Rasseneinteilungen und zwar a) solche, die nur ein Merkmal der Gruppierung zugrunde legen: „künstliche“. im Sinne des Linnéschen künstlichen Pflanzensystems; b) „natürliche“, die die gesamte Morphologie und Physiologie zu berücksichtigen suchen.

Es seien erwähnt als Beispiele zu 1. „Rassen- und Völkereinteilungen“ der Einteilungsversuch von F. Müller: Er unterscheidet lediglich nach der Haarform: I. Wollhaarige, die zerfallen in a) Büschelhaarige, b) Vlieshaarige; II. Schlichthaarige, die wieder zerfallen in a) Straffhaarige und b) Lockenhaarige. Die Unterabteilungen werden dann nach Sprachstämmen eingeteilt, so daß dann Völkernamen figurieren (Papua, Neger, Kaffern usw.).

Aus neuerer Zeit sei der Versuch von G. Fritsch genannt, der dann von Stratz (1901) übernommen wurde. Da werden Standvölker, Protomorphe unterschieden, die in relativer Unkultur blieben, die Reste von Urbevölkerungen darstellen; über ihre gegenseitige Stellung wird nichts gesagt. Dann kommen Archimorphe, die herrschenden Rassen, die in drei Stammrassen, schwarze, weiße, gelbe, zerfallen. Sie sollen aus sich, teilweise aus mehreren Wurzeln zusammengeflossen, zahlreiche Gruppen haben entstehen lassen, die als metamorphe bezeichnet werden, es werden dann Völker und kleinere Stämme aufgezählt; Fritsch (1910) gibt neuerdings eine Uebersichtstafel. Von einer Rassensystematik ist der Versuch sicherlich noch weit ab.

Von „künstlichen“ Systemen seien folgende erwähnt: Nur nach der Schädelform haben A. Retzius und seine Nachfolger in orthognathe und prognathe Dolichocephalen und ortho- und prognathe Brachycephalen die Menschheit einteilen wollen, Kollmann teilt sie nach Schädel- und Gesichtsform ein: Langschädelige Breitgesichter, mittellangschädelige Breitgesichter, kurzschädelige Breitgesichter, langschädelige Schmalgesichter usw.; diese 6 Kategorien zerfallen dann jede in eine glatthaarige, lockige oder krausbaarige Varietät, so daß es 18 Varietäten sind.

Endlich „natürliche“ Systeme: bezüglich der großen, auf tiefgreifende Unterschiede gegründeten Kategorien sind solche leicht aufzustellen; diese Unterschiede wurden daher schon seit langem benannt. Schon Linné spricht vom Homo europaeus, asiaticus, afer und americanus; alles andere und ebenso vieles in den Diagnosen dieser Rassen ist unwissenschaftlich und phantastisch, es hat keinen Sinn, sich heute gelegentlich auf Linné stützen zu wollen. Dagegen ist die Blumenbachsche Einteilung vor allem in Laienkreisen noch die Einteilung. Sie ist nach heutigen Ansichten zu schematisch, es lassen sich nicht alle Stämme in wenige ganz große Kategorien einreihen; ferner ist der Name der ersten Kategorie, „kaukasisch“, gewählt, um die Herkunft der betreffenden Gruppe anzudeuten — jene Hypothese ist heute verlassen, der Name also irreführend geworden. Blumenbach teilt ein in kaukasische, mongolische, äthiopische, amerikanische, malayische Varietät. Die französischen Anthropologen folgen meist Cuvier, den Broca und Topinard ausbauten, sie nehmen drei große Rassen an: die weiße, gelbe, schwarze. Huxley stellt auf: australoiden, negroiden, xanthochroischen (= hellweißen, blonden), mongoloiden Typus. Dazu kämen die Melanochroen (z. B. dunklen Südeuropäer) als Untervariante oder Mischprodukt.

Ein System, das wirklich prinzipiell versucht die einzelnen kleineren Rassegruppen auf Grund ihrer gesamten Morphologie zu fassen, ist das von Deniker (1900); als wichtigste Merkmale legt er Haarform, Hautfarbe, Nasenform, Kopfform, Körpergröße zugrunde. Die Einteilung in jene Hauptzweige unterbleibt ganz, vielmehr werden 6 Gruppen nach Haarform, Haar- und Augenfarbe angenommen, aber nicht benannt, die dann in 29 Rassen zerfallen. Diese erhalten zum Teil wirkliche, von Deniker eingeführte Rassennamen, zum Teil Völkernamen. Die Namen der Rassen sind: A. Wollhaarig-Breitnasige: 1. Buschmänner, 2. Negrito, 3. Neger, 4. Melanesier. B. Lockig- oder Welligbaarige: 5. Aethiopier, 6. Australier, 7. Dravida, 8. Assyroide. C. Welligbraunes oder schwarzes Haar, dunkle Augen: 9. Indo-Afghanen, 10. Araber oder Semiten, 11. Berber, 12. Atlanto-Mediterraner, 13. Ibero-Insulaner, 14. Westeuropäer, 15. Adriatiker (bezüglich Nr. 12 bis 17 s. unten 5b „Europa“) D. Blond, wellig- oder geradhaarig, helle Augen: 16. Nordeuropäer, 17. Osteuropäer. E. Gerad- oder wellighaarig, dunkel, schwarzäugig: 18. Ainu, 19. Polynesier, 20. Indonesier, 21. Südamerikaner. F. Gerades Haar: 22. Nordamerikaner, 23 Zentralamerikaner, 24. Patagonier, 25. Eskimo, 26. Lappen, 27. Ugrier, 28. Turk-Tartaren, 29. Mongolen. Jede „Rasse“ ist rein somatisch kurz charakterisiert, so daß es also wirklich eine Rasseneinteilung ist trotz der Völkernamen; die Gruppierung ist rein nach diesen somatischen Merkmalen durchgeführt.

Den ersten moderneren Versuch, die Menschheit wirklich zoologisch einzuteilen und die Gruppen nach zoologischem Prinzip zu benennen, macht L. Wilser, der auch die Notwendigkeit einer konsequenten Nomenklatur stets betonte; danach wären nur die größeren Gruppen mit zoologischen

Namen zu benennen, die allergrößten mit Speciesnamen (Wilser 1906, 1911, 1912). Danach zerfällt die Menschheit in Proanthropus erectus (= Pithecanthropus Dubois), Homo primigenius, dann: Homo europaeus, Homo niger s. afer und Homo brachycephalus s. asiaticus. Homo europaeus umfaßt Homo europaeus var. fossilis (= Cro-Magnon), Homo europaeus var. mediterranea oder kurz Homo mediterraneus, der dann wieder einen Homo mediterraneus var. fossilis (Brünn, Brüx usw.) enthält. Der Homo niger hat eine variatio fossilis (= Grimaldi), eine var. australis u. a; der Homo brachycephalus eine var. fossilis (= Grenelle, Furfooz usw.), eine var. alpina, eine var. americana usw.

Wilser berücksichtigt hauptsächlich die europäische Menschheit, was sonst alles als „Rassen" uns entgegentritt, interessiert ihn weniger, so ist sein System für diese nicht ausgebaut. Die größte Schwierigkeit, die er sich selber schafft, ist das Beharren auf einigen Linnéschen Ausdrücken; „sapiens" hat er in der neuesten Arbeit (1912) weggelassen; er wird auch „europaeus" nicht mehr der Linnéschen Definition zuliebe (die doch großenteils voll Unwissenschaftlichkeit steckt) auf die „nordische" Rasse anwenden können.

Am entschlossensten geht bezüglich der Nomenklatur und Einteilung Sergi vor (1911). Noch in seinem Werke „Europa" (1908) hat Sergi an die ältere Ausdrucksweise Homo angeknüpft, jetzt (1911) legt er in „L'uomo" eine konsequent durchgeführte Einteilung vor. Schade ist, daß er zum Teil Namen wählt mit Rücksicht auf seine Theorie der Herkunft der betreffenden Rasse. Man könnte z. B. gerne sich darauf einlassen, seine Systematik im großen ganzen, nicht aber seine Theorie der Herkunft des Europäers von Zentralafrika anzunehmen. Sein Werk erfährt von Wieth-Knudsen (1912) eine schöne Besprechung, worin dieser jenen Fehler in einem Vorschlag zu korrigieren sucht.

Sergis (1911) System ist folgendes: Seine Einteilungen der Primaten überhaupt und die Ausführungen über die Beziehungen der vier Anthropoiden zu menschlichen Stämmen sollen hier übergangen werden (vgl. den Artikel „Anthropogenese", Bd. I, S. 478). Er nennt die ganze Menschheit (ausgestorbene und lebende) Hominidae. Diese zerfällt in 5 Genera (I bis V), von denen jedes in mehrere Species (1 bis x), jede Species in varietates (a bis x), einzelne solche in subvarietates (α bis ξ) zerfallen. In folgender Tabelle sind im Anschluß an Wieth-Knudsen unter einzelne Varietäten in Klammer die Namen der Völker beigesetzt, die größte Teile der betreffenden Rasse enthalten.

Sergis Systematik ist folgende:

I. Palaeanthropus (genus) — ausgestorben.
  1. Palaeanthr. europaeus (= Neandertaler usw.).
  2. Palaeanthr. krapiniensis.
  3. Palaeanthr. heidelbergensis.

II. Archaeanthropus (genus) — ausgestorben.
  1. Archaeanthr. pampaeus (= La Tigra usw.).

III. Notanthropus (genus) (νότος, Süden).
  1. Notanthr. eurafricanus (spec.).
    a) Not. eurafr. nordicus (Schweden, Norwegen).
    b) Not. eurafr. africus (Abessynier, Galla usw.).
    c) Not. eurafr. dravidicus.
    d) Not. eurafr. polynesianus.
    e) Not. eurafr. tod-ainu.
    f) Not. eurafr. mediterraneus.
      α) Not. eurafr. medit. europaeus (Süditalien).
      β) Not. eurafr. medit. libycus.
      γ) Not. eurafr. medit. arabicus.
      δ) Not. eurafr. medit. egyptianus.
      ε) Not. eurafr. medit. indoiranus.
  2. Notanthr. afer (mit mehreren Var.).
  3. Notanthr. australis (= Hottentotten).

IV. Heoanthropus (genus) (ἕως Osten).
  1. Heoanthr. eurasicus.
    a) Heo. euras. europaeus (Großrussen).
    b) Heo. euras. asiaticus (= bisheriger alpinus).
  2. Heoanthr. arcticus (mit mehreren Var.).
  3. Heoanthr. orientalis (mit mehreren Var.).

V. Hesperanthropus (genus) (ἕσπερος, Westen).
  1. Hesperanthr. Columbi (mit mehreren Var. (Indianer, Eskimo)).
  2. Hesperanthr. patagonicus.

Es wurden eine große Zahl Variationen ausgelassen, um den Ueberblick zu erleichtern.

Wieth-Knudsen schlägt nun vor, an Stelle der aus Sergis ureigenster Hypothese des afrikanisch-negroiden Ursprungs der Europäer stammenden Gattung Notanthropus einen „Europaeus" und „Afer" getrennt zu setzen. Wenn man in Sergis Nomenklatur bleiben wollte, müßte man Notanthropus für die Afrikaner reservieren und die Europäer als genus Boreanthropus (mihi) daneben stellen; es wäre dann noch darüber zu diskutieren, wieweit die Domäne eines jeden ginge und welches Hybridtypen in Sergis Sinn. Wieth-Knudsen würde den Europaeus in die Variationen balticus und mediterraneus zerlegen und letztere in die subvar. italicus, adriaticus (= „dinarische Rasse), libicus arabicus, aegyptianus, indo-iranus. Dabei ist nur bezüglich des adriaticus ein Widerspruch zu erheben, dessen Brachycephalie und hoher Wuchs ihn eher zu alpinus oder eurasicus stellen lassen.

Seitdem ist keine Diskussion mehr erfolgt, so daß man Sergis Werk als einen Vorschlag, jedenfalls aber als den konsequentesten Versuch einer Rasseneinteilung

ansehen muß. Ueber seine Ansichten betreffend Herkunft der Europäer, rassenmäßige Zusammensetzung der ursprünglichen Indogermanen ist damit nichts ausgesagt.

5b) Spezielle Rassenbeschreibung (Ueberblick). Wie oben angegeben, soll hier lediglich ein Ueberblick gegeben werden darüber, was von zusammenhängenden Rassenbeschreibungen überhaupt schon vorliegt. Auf die Schilderung der Rassen selbst wird gar nicht eingegangen werden. Von zusammenfassenden Darstellungen sei auf die eben genannten Werke von Deniker und Sergi hingewiesen (letzteres mit zahllosen Typen), dann weiter auf Ranke, Der Mensch, auf Hoernes, Natur- und Urgeschichte des Menschen, Wien 1909, Lampert, Die Völker der Erde, Stuttgart (o. J.), Martin, Wandtafeln für den Unterricht in Anthropologie (je mit Beschreibung und Literaturverzeichnis), Zürich (o. J.).

Europa. Schon allein die Völkerwanderungen, die uns die Geschichte lehrt, sollten ein ungeheures Chaos von Rassetrümmern in Europa zustande bringen; da könnte man denken, es sei ganz unentwirrbar, wenn uns Sprachforschung und die Wissenschaft des Spatens lehren, daß vor der hellen Geschichte wohl noch größere Wanderungen stattfanden und Umwälzungen sich im Dunkel der Vorzeit verlieren. Und doch gelingt es, nicht nur die Rassenmerkmale statistisch zu fassen, sondern auch Rassen zu rekonstruieren. Deren heutige Zahl und Verteilung festzustellen, ist das eine Problem, sie auf vorgeschichtliche zurückzuführen und diese letzteren zu bestimmen, das zweite — beide rein anthropologisch. Ein drittes faßt die Beziehungen der Rassen zu den alten Völkern an, sucht deren Herkunft und rassenmäßige Natur zu ergründen: da muß Anthropologie, Prähistorie und Linguistik zusammenarbeiten; Indogermanenfrage, Ligurer-, Etruskerfrage, Finnenproblem und anderes sind hier die Einzelaufgaben.

Die Anthropologie Europas stellt Ripley (1899) zusammenhängend dar; in neuerer Zeit sind aber von Deniker (1899, 1904, 1908) sehr schöne Uebersichten über die Rassenmerkmale erschienen. Er stellt alle Angaben über die Verteilung der Rassenmerkmale zusammen und auf farbigen Karten dar. Beifolgend (Fig. 1, 2, 3) sind der großen Wichtigkeit wegen drei seiner Karten (allerdings ohne Farben und unter Zusammenziehung einiger seiner Stufen) hier wiedergegeben. Deniker kommt auf Grund seiner Karten zur Annahme von sechs Rassen für Europa. Deren vier dürften als sicher feststehend gelten, zwei werden wohl nicht allgemein anerkannt werden. Die Rassen sind folgende: 1. Nordische Rasse, groß, blond, helläugig, langschädelig, schmales Gesicht, schmale gerade Nase. Verbreitung: Skandinavien, Dänemark, Holland, Schottland, Nordengland, Oldenburg, Mecklenburg, wahrscheinlich Preußen (das nicht untersucht ist), baltische Provinzen, Teile von Finnland. 2. Ostrasse: gegen vorige kleiner, breitgesichtiger, breitnasiger. Verbreitung: Weißrussen. Dies ist doch wohl keine selbständige Rasse, sondern Mischprodukt, vielleicht aus 1. und 3. oder 1. und asiatischen Elementen. 3. Westrasse, besser bekannt als „alpine" Rasse: kleinwüchsig, braun, sehr brachycephal, Gesicht rund, Nase breit. Verbreitung: Westeuropa, Cevennen, Zentralplateau, Provence, Toskana, Umbrien, Zentralschweiz, Süddeutschland, gemischt von der Loire bis Rußland. 4. „Iberisch-insulare" oder besser mediterrane Rasse. Schwarzbraun, klein, dunkelhäutig, schmale, gerade Nase. Pyrenäische Halbinsel, Corsica, Sardinien, Perigord, Italien südlich von Rom an. 5. Küsten- oder Atlanto-mediterrane Rasse; groß bis mittelgroß, mittelbreitschädelig, dunkel. An der Küste von Gibraltar bis Tibermündung und Gibraltar bis Nordportugal, unteres Tal der Loire. Diese Rasse dürfte als selbständige vielfach nicht anerkannt werden. 6. Adriatische oder dinarische Rasse. Sehr groß, sehr kurzschädelig, dunkel. Gerade oder konvexe Nase. Verbreitung: Nordumfang des adriatischen Meeres, Bosnien, Dalmatien, Kroatien, zentrale Teile der Balkanhalbinsel; solche Menschen aber auch in Nordwestböhmen, romanische Schweiz, Elsaß.

Soweit Deniker. Es sei nochmals hinzugefügt, daß die nordische, alpine, mediterrane und dinarische Rasse wohl ganz allgemein anerkannt sind (ihre Grenzen sind durch Kombination der drei Karten zu ersehen).

Bezüglich der Herkunft wird heute die zuerst von Wilser aufgestellte Behauptung der nordischen Urheimat der blonden Rasse bei weitem die wahrscheinlichste sein, wobei dann bald mehr an Skandinavien, bald an Niederdeutschland, bald an die Ostseeufer gedacht wird. Sergi („Europa" und „L'uomo") nimmt afrikanischen Ursprung an. Die alpine Rasse wird meist als asiatischen Ursprungs, ein westlicher Teil der großen asiatischen brachycephalen Bevölkerung aufgefaßt. Giuffrida-Ruggeri u. A. nehmen eine autochthone Entstehung in Westeuropa an, auf die diluvialen Kurzschädel hinweisend.

Die mediterrane Rasse wird teils als ganz eigene Südrasse, teils (Sergi) als ein Zweig der nordafrikanischen und verwandt mit vorderasiatischen Gruppen aufgefaßt (Semiten). Endlich halten sie manche für einen Teil der nordischen Rasse, der nur ein-

gedunkelt und kleiner geworden ist. Auch die dravidische Bevölkerung Indiens gehörte dann hierher. Die dinarische Rasse endlich dürfte in engstem Zusammenhang stehen mit dem „armenoiden" (v. Luschan) Typus Kleinasiens (s. unten), so daß dann dieser bis Zentraleuropa reichte, wahrscheinlich weiter als man meistens denkt. Die

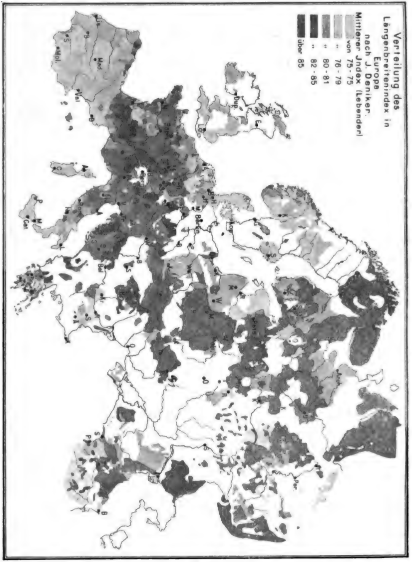


Fig. 1.

Abgrenzung ist schwer, weil sie gegen die alpine Rasse zu erfolgen hat und beide sind brachycephal und dunkel (Nasenform und Körpergröße aber sehr verschieden). Toldt (s. oben) wies jüngst zweierlei Brachycephalie an zentraleuropäischen Schädeln nach; ob da Zusammenhänge mit diesen Rassen bestehen?

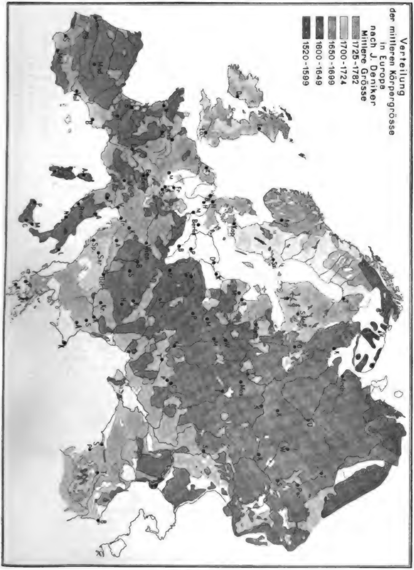


Fig. 2.

Man darf wohl sagen, sämtliche Völker Europas enthalten mindestens von dreien dieser vier Rassen Bestandteile, die meisten von allen vieren. Was sie anthropologisch

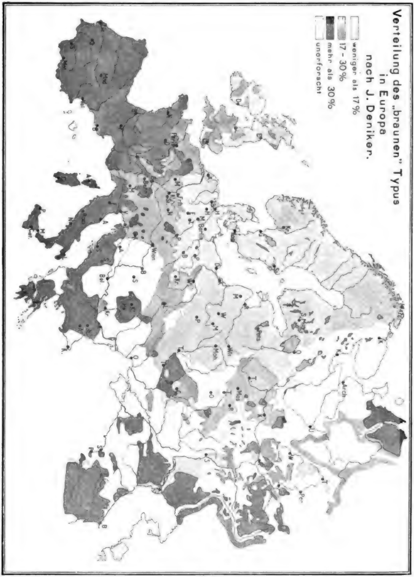


Fig. 3.

unterscheidet, sind der Wechsel und die Grade des Vorherrschens einzelner (Einzelheiten siehe bei Kraitschek 1903).

Eine Rückführung der heutigen Schädelformen auf frühere hat vor allem Schliz (1912) versucht, es sind aussichtsreichste Anfänge; danach kann man wohl die Schädelform der späteren Völkerwanderungsgermanen bis in früheste prähistorische Perioden nach Skandinavien und Nordwestdeutschland verfolgen. Ebenso dürfte je eine der keltischen La-Tène-Kultur, bestimmter Hallstattkultur und bestimmten neolithischen Kulturströmen eigene Schädelform festzustellen sein; aber all das bedarf noch vieler Arbeit bis es als festes Fundament betrachtet werden kann. Man beginnt aber auch hier an die Rekonstruktion vorgeschichtlicher Völker zu gehen (vgl. Classen 1912, Kossina u. a.). Dieser letztere Punkt führt dann zur Frage nach der Herkunft der europäischen Völker und der Natur ihrer ursprünglichen Rassenzusammensetzung. Der größte Streit tobte um die Indogermanenheimat. Die früher felsenfest geglaubte östliche Heimat ist so gut wie ganz und allgemein aufgegeben. Es nimmt niemand mehr an, daß die indischen Sprachen die Reste sind, die in der alten Heimat blieben. Die nördliche Heimat eines ziemlich einheitlichen urindogermanischen Volkes ist heute die angesehenste Theorie, für deren Richtigkeit Anthropologie, Sprachzeugnisse, Prähistorie sprechen. Daneben wird noch als erste Heimat Südrußland verteidigt und von da aus soll dann nur ein Hauptstrom nach Nordwesten gezogen sein (s. Hirt, Kossina, Penka, Schrader, Wilser u. a.). Der rassenmäßige Hauptträger dieses Volkes war die nordische Rasse und sie ist — allerdings in Mischung — verbreitet gewesen soweit indogermanische Sprachen sich ausbreiteten — das ist wohl die bestbegründete Annahme, der Sergi die wenig Anklang findende der asiatischen Herkunft eines indogermanischen, rassenmäßig brachycephalen Volkes entgegensetzen möchte.

Die anderen oben angedeuteten Völkerfragen harren noch derart der Lösung, daß sie hier nicht dargestellt werden können, ebensowenig wie einige rein anthropologische, wie nach den prähistorischen Schädeltypen in England, den „grünen“ Augen zentralasiatischer Völker in chinesischen Berichten usw.

Vorderasien. Durch die intensive Bearbeitung, die die Frühgeschichte Vorderasiens seitens der Archäologen erfährt, wird dauernd an die Anthropologie die Anforderung gestellt sein, über die Rassenverhältnisse der heutigen, vor allem aber der alten Bewohner Auskunft zu geben. Erst weniges steht einigermaßen fest. Am meisten erörtert ist die Hettiterfrage, schon weil sie mit der nach der rassenmäßigen Zusammensetzung des jüdischen Volkes eng zusammenhängt. Da hat v. Luschan (1911) gezeigt, daß die Grundlage der kleinasiatischen und ganzen vorderasiatischen Welt eine Bevölkerung bildete — schon vom 2. vorchristlichen Jahrtausend an, die er als „armenoide“ Rasse bezeichnet. Sie ist heute nachweisbar in Reliktenbevölkerungen, also in abgelegenen Berglanden, Sektiererbevölkerung usw. Ihr körperlicher Typus ist scharf charakterisiert (Fig. 4) durch das wie „abgehackt“ flache



Fig. 4. „Armenoider“ Typus. Profil nach v. Luschans Photographie (1911). $^2/_3$.

Hinterhaupt, durch eine gewaltige, gebogene, grobe Nase. Auf hettitischen Bildwerken etwa aus dem Ende des 2. vorchristlichen Jahrtausend ist der Typus deutlich dargestellt (Fig. 5; der Wichtigkeit dieses Typus wegen soll er hier reproduziert werden).



Fig. 5. Hettitisches Relief. Profilzeichnung nach v. Luschans Photographie (1911). $^2/_3$.

Das Volk der Hettiter ist sicher nicht „die“ armenoide Bevölkerung, sondern nur ein zu

einem Volk organisierter Teil, der größtenteils aus solcher besteht. Sie wurde dann vom etwa 9. vorchristlichen Jahrhundert an „semitisiert". Semitische Völker bildeten sich durch Verschmelzung der vom Süden einwandernden Semitenscharen mit der armenoiden Urbevölkerung. Diese Scharen sind körperlich ein anderer Typus. Ein einheitlicher Name besteht nicht; es ist der Typus, der von Sergi als „arabicus" und „aegyptianus" bezeichnet wird. Meist spricht man von „semitischem" Typus, was genau so inkonsequent ist, wie von „arischem" Typus zu sprechen. Man könnte sie, die das schufen, was wir als „Orient" uns Abendländern gegenüberstellen, als „orientalische" Rasse bezeichnen (mihi), die man sich als klein, schmalschädelig, mit zierlichen feinen, deutlich geschwungenen Adlernasen versehen vorstellen muß. Es ist die Nase, die man gelegentlich an feinsten Gesichtern sephardimscher Jüdinnen sieht. Der Typus ist auf assyrisch-babylonischen Bildern oft dargestellt. v. Luschan zeigt weiter, wie aber eine dritte Bevölkerungswelle in jene semitischen Völker eindrang; aus der mächtigen Bevölkerung, die um die Zeit des 2. vorchristlichen Jahrtausends die Donautiefländer erfüllte, von der ein Teil, der den alten Kulturen bekannt wurde, als thrakische Horden bezeichnet wurde, drangen etwa um die Mitte jenes Jahrtausends Teile über Klein- und Vorderasien ein. Sie erscheinen bei den Semiten als Amoriter. Sie dürften groß, blond, langschädelig gewesen sein, Vertreter (wenn auch nicht mehr in toto nur solche, sondern gemischt) der nordischen Rasse. Auf sie führt v. Luschan u. a. das Blond im Judenvolk teilweise zurück, während andere eine Angleichung (äußere Einflüsse oder Zuchtwahl) in Europa annehmen, oder Aufnahme fremder Elemente in der Diaspora.

Die Frage nach der rassigen Zusammensetzung der Juden ist noch nicht einwandfrei gelöst, insbesondere macht die Kurzköpfigkeit der askenassischen und Langköpfigkeit der sephardimschen große Schwierigkeit. Ebenso läßt sich über die Bevölkerungen der Sumerer, der Akkader heute noch nichts Definitives hier zusammenfassen. Es dürften noch mehrere Rassenkomponenten drin stecken, wohl sicher der rein mediterrane, der auch auf Kreta und Aegypten einigermaßen nachweisbar ist; vielleicht auch eine negroide Komponente; auch eine eigentlich asiatische, mongoloide? Da gilt es also noch viele Arbeit zu tun.

Nordafrika. Hier sind es die ägyptische, die Berber- und die Guanchenfrage, die im Vordergrunde des Interesses stehend, alle drei als ungelöst bezeichnet werden müssen. Das gewaltige Problem, das die reichen Skelettreste Aegyptens, die Bilderreihen der Grabkammern und die jetzt erfreulich zahlreichen Plastiken der Anthropologie stellen, ist noch im vollen Fluß. Ueber grundlegende Fragen wird noch gestritten, so daß der eine Autor von einer „neuen Rasse" (d. h. neueingewandert) spricht, wo der andere sie direkt als „die alte" (d. h. älteste) bezeichnet. Man vergleiche Flinders Petrie, Elliot Smith u. A. Die ältesten prädynastischen Rassen Unterägyptens kennen wir nicht; die oberägyptischen sind (man kennt nur wenige wirklich prädynastische Serien) klein bis mittelgroß, schmalschädelig (schmäler als die dynastischen), „pentagonoid", mit schwarzem oder braunem, geradem oder welligem, nicht negroidem Haar. Beim Uebergang in die dynastische Zeit wird der Schädel breiter, robuster (nachweisbar nicht durch Kultureinflüsse), die vorher kurze und niedere Nase wird schmaler. Diese Aenderung muß durch generationenlange Durchdringung von Unterägypten her erfolgt sein. Man denkt für die prädynastischen Formen an eine „mediterrane" Grundlage, wie sie in den Berbern steckt, die Benennung ist strittig, manche sagen ganz kurz und praktisch einstweilen einfach the „non-negroid" type; die dynastische Durchdringung brachte dann vielleicht eine Komponente mit, die nach Asien Beziehungen hat (armenoide?). Die negroide Mischung war sehr gering (höchstens 2% Schädel). Aber in Nubien und dann in Oberägypten trat zur Zeit der 3. Dynastie und dann im mittleren Reich eine starke Mischung mit negroiden Elementen auf. Trotzdem ist der alte prädynastische Typus hier fast weniger alteriert worden, wie der in Unterägypten durch die Einwanderung von Norden her. Auch hellfarbige blonde Elemente traten sehr wahrscheinlich hier mit ein, wodurch das Berberproblem Nordwestafrikas (die Ammoriterfrage als Parallelerscheinung) hier mit hereinspielt. — Alle Einzelheiten bedürfen noch sehr der Ausarbeitung, aber man muß heute schon sagen, die Engländer haben sich durch tüchtige anthropologische Arbeit und sehr schöne Publikationen große Verdienste erworben.

So interessant wie diese Nordost- ist die Nordwestecke Afrikas, aber mangels des reichen ägyptischen Materials viel weniger bearbeitet und weniger gelöst. Man kann davon ausgehen, daß heute noch im Atlas, in der großen Kabylie usw. Blonde vorkommen; Lissauer (1908) fand 13% hellbraun oder blond, 12% mit blauen oder blaugrünen Augen; die Typen und Schädel gleichen völlig denen der nordischen Rasse. Sie waren schon den Alten bekannt, haben sicher mit den Vandalen nichts zu tun, man muß an prähistorische nordische Einwanderung denken. Nun erheben sich aber eine

Menge Detailfragen, nach den Dolmen, den Beziehungen zu den Iberern, nach der Herkunft und dem Schicksal ihrer Sprache, des Tamaschek. Mit diesem ist die alte Sprache der Guanchen auf den kanarischen Inseln verwandt, so daß auch die anthropologische Stellung dieser Bevölkerung hiermit zusammenhängt. Guanchenschädel lassen Beziehungen zu solchen aus Südspanien aus der Bronzezeit erkennen, dann aber zum Cro-Magnon-Typus, andererseits aber zu Aegypterschädeln des alten und mittleren Reiches — mehr kann man aber heute noch nicht sagen.

Uebriges Afrika. Zwei Probleme dürften hier zurzeit die brennendsten sein: Die Erforschung der Pygmäen und die Frage nach den Beziehungen der beiden großen Sprachgruppen der Bantu und Sudan zu der ursprünglichen negroiden Bevölkerung. Die Pygmäen erfuhren von W. Schmidt (1910) eine umfangreiche Bearbeitung — aber von einer Lösung ist die Pygmäenfrage noch weit! Wie sich Buschmänner (an deren Erforschung Pöch, Seiner u. a. fleißig arbeiten) zu den eigentlichen Pygmäenstämmen (Kongo, Seengebiet, Kamerun) verhalten, ist noch ganz unklar (da fehlen übrigens auch noch die sprachlichen Studien fast ganz!). Als ganz sicher dürfen wir nur annehmen, daß einstens pygmäenhafte Negroide über wohl das ganze Afrika verbreitet waren. Daß Pygmäen mit sogenanntem Hottentottensteiß („Steatopygie“, vgl. den Artikel „Körperformen der Menschen“) den alten Aegyptern bekannt waren, ist aus Abbildungen von solchen zu sehen. Daß aber Plastiken mit deutlich dargestellter Steatopygie nicht nur auf Kreta, sondern auch in Funden aus der Steinzeit Oesterreichs (Fig. 6) sich finden, zeigt, daß die betreffenden Menschen wohl auch einmal auf europäischem Boden saßen. Man kennt solche aus Griechenland, Niederösterreich und vor allem aus Zentralfrankreich. Wenn man weiter an gewisse Stilistik der Rundskulptur in Afrika und im europäischen „Solutréen“ denkt, an die sogenannten Buschmannzeichnungen Südafrikas, die sich ähnlich bis herauf nach Tunesien finden, aber auch an spanische und französische Höhlenzeichnungen der Steinzeit gemahnen, eröffnen sich heute noch nicht übersehbare Perspektiven. Wie die afrikanischen Pygmäen sich zu der oder den Urnegerrassen verhalten, ist heute ganz unentscheidbar.

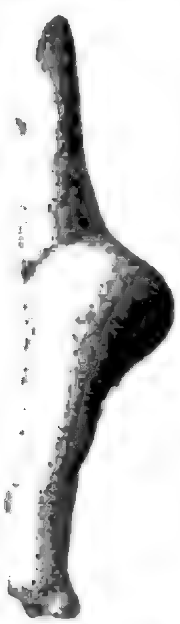


Fig. 6. Neolith. Tonidol aus Siebenbürgen. Nach Hoernes, Natur- und Urgeschichte.

Diese Urnegerbevölkerung ist ebenfalls ganz problematisch. Man hat früher gern den Bantu als den Neger angesehen und das schwer übersehbare Bild der Sudangruppe vernachlässigt. Beides sind ja linguistisch-ethnographische, nicht anthropologische Begriffe. Anthropologisch ist wohl die Sudangruppe das buntere Bild, sie enthält Gruppen, die überhaupt kaum etwas von dem haben, was man als Neger bezeichnen kann, wenn der Begriff anthropologisch überhaupt noch brauchbar sein soll. Aber trotz oder besser vielleicht gerade wegen der Buntheit dieser Sudangruppe trifft man in ihr Stämme, die wohl den alten Typus mit am besten repräsentieren, wie an der Guineaküste usw. Auch isolierte selbständige afrikanische Gruppen, wie die Bergdamara bergen vielleicht solch alte Reste. Die Bantu dagegen scheinen doch stark abgeändert, beeinflußt durch Rassen aus Nord- und Nordostafrika, die „orientalische“ am meisten, oder für das Gebiet der Völkerkunde ausgedrückt: semitisiert und hamitisiert (v. Luschan), wie sie ihrerseits jene Völker „vernegerten“. Diese Prozesse auf somatischem und ethnischem Gebiet klarzulegen, wird noch sehr viel Arbeit kosten, es wird aber allmählich gelingen, so gut wie der Nachweis des Semiteneinschlages in die Hottentotten geglückt ist (v. Luschan).

Eine wirkliche „Anthropologie“ eigentlicher negroider Gruppen fehlt noch völlig, die ersten Anfänge zu solchen legt Czekanowski (1911) vor.

Malayischer Archipel und Südsee. Einen der schönsten Triumphe hat konsequente anthropologische Arbeit hier feiern können. Den Arbeiten Sarasins, Martins, dann Hagens, Moszkowskis ist es gelungen, dort das schier unentwirrbare Völkergemisch anthropologisch zu analysieren.

Man kann heute unterscheiden: Die Weddaische Urschicht (Sarasin). Die von Sarasin musterhaft beschriebenen Wedda auf Ceylon, Toala auf Celebes, die Senoi auf Zentralmalakka (Martin), die Kubu auf Sumatra (Hagen), die Sakei ebenda (Moszkowski), dann eine Anzahl wenig untersuchter Stämme (oder Teile von solchen) auf dem indischen Festland (die Kha, die Moi, die Penong u. a.) bilden die letzten Reste einer uralten Bevölkerungsschicht, in Fetzen zersprengt durch die übergelagerten Malayen. Sie dürfte schon vor der geologischen Trennung der heutigen

malayischen Inseln dort gesessen haben. Ihre Beziehungen zu Australien sind unklar, sie könnten aber wohl mit den Australiern aus gemeinsamer Wurzel stammen, beide hätten dann manches abgeändert, daher ihre heutigen Differenzen. Die körperliche Charakterisierung der weddaischen Schicht — die Forscher vermeiden vorsichtig dafür das Wort Rasse — ist sehr gut durchgeführt — doch muß sie hier beiseite bleiben (s. Literatur).

Im selben Gebiet besteht noch eine zweite, ebenfalls nur in Trümmern vorhandene Schicht, sie ist im Gegensatz zu den welligharigen Weddas stark kraushaarig, wird als negritische bezeichnet. Martins vorzügliches Werk hat die Semang zu den bestgekannten Repräsentanten davon gemacht; dann gehören die Andamanen, die Negritto von den Philippinen und andere hierher. Hier noch zu lösende Fragen sind die nach ihren Beziehungen zu den negritisch-afrikanischen Pygmäen, dann zu papuanischen Elementen, endlich die Beziehungen zwischen weddaischer und negritischer Schicht; diese Fragen sind noch unentschieden. In die papuanische Bevölkerung geht die negritische Schicht gewiß hinein, man hat dort kleinwüchsige, auch eng kraushaarige, Formen getroffen (Pöch, Schlaginhaufen), aber eine Abgrenzung ist bei der Aehnlichkeit vieler anthropologischer Merkmale besonders schwer. Sollten negritische Schicht und Papua sich verhalten wie weddaische und Australier?

Auch auf sprachlichem Gebiet ist da von W. Schmidt (1906) gewaltige Arbeit geleistet worden, auch ein altes gemeinsames Sprachband vereinigt die alten anthropologischen Gruppen.

Die Schicht endlich, die sich über jene beiden gelegt hat, sind die sogenannten Malayen. Auch da kann man heute eine doppelte Schichtung unterscheiden: eine ältere Lage sitzt heute als sogenannte Urmalayen, Protomalayen, Urschicht usw. im Innern der großen Inseln, so die Battak, Dajak, Tenggerer, Igoroten usw., wieviel Blut sie von den negritischen und (oder) weddaischen Schichten aufgenommen, ist kaum mehr erkennbar. Wie sie zu Gruppen weiter draußen in der Südsee stehen — Polynesiern — ist unbekannt, woher sie kommen, wo ihre Beziehungen auf dem heutigen Festland sind, ebenfalls. Eine jüngere Lage stellen die „Deuteromalayen", Küstenmalayen, Malayen (kurzweg) dar, die als Javanen und Andere reiche Kultur entfaltet haben; deren Beziehungen zur indischen und mongoloiden Welt sind sicher, aber nicht klar.

In der Südsee spottet bis jetzt das Völkergemisch jeder umfangreicheren anthropologischen Analyse. Man kann stellenweise das Dunkel hier und da beleuchten, einmal zeigen, wie polynesische Einflüsse nach Melanesien wirken, wie die Mikronesier eine Mittelstellung einnehmen, eine zusammenfassende Darstellung zu geben, ist heute noch unmöglich. Alle Angaben über Zusammenhänge von Polynesiern mit europäischen Elementen, von Australiern mit europäischen, ostafrikanischen, indischen Elementen sind lockerste Hypothesen und Eindrücke. Die Stellung der Australier endlich zur übrigen Menschheit ist ebenfalls noch unklar, wäre aber zu kennen besonders interessant, nachdem Klaatsch an Australiern „präneandertaloide" Merkmale, jedenfalls eine ganz außerordentlich primitive Rasse kennen gelehrt hat.

Asien (außer Vorderasien). Anthropologisch bearbeitet zu nennen sind hier nur die Japaner dank der Arbeit von Baelz (1880) (anatomisch sind dann Arbeiten von Adachi u. a. zu nennen, vgl. den Artikel „Rassenmorphologie"). Die ganze ungeheuere Welt Chinas und Innerasiens harrt noch der Bearbeitung.

Noch ungelöst ist die Frage, woher die sicher nicht mongolischen Ainu stammen, die Baelz nicht nur unter den eigentlichen Ainu, sondern auch sonst in Japan in Resten findet; er stellt ihren kaukasoiden Typus fest, der aber gleichzeitig in manchem an Australier erinnert. Sergi bringt die Todas in Indien damit in Zusammenhang. — Die Beziehungen der Mongolen zu europäischer Bevölkerung ist noch ganz dunkel.

In Indien ist es die arische Frage, die neben den Linguisten und Ethnographen den Anthropologen fesselt: welches die genaueren Beziehungen des schmalnasigen, völlig europäisch aussehenden, aber tief brünetten Typus zu den einzelnen Rassen Europas sind, liegt noch lange nicht klar.

Amerika. Weder für die Eskimo, noch für die Indianerstämme mit ihren einzelnen, recht differenten Unterabteilungen sind die Herkunft und die Beziehungen zu Europa, Asien, der Südsee klar gelegt, noch ist die gegenseitige Stellung beider zu entscheiden — das sind die großen Probleme, die noch der Lösung entbehren. Es liegen eine Anzahl sehr schöner anthropologischer Monographien vor (s. Literatur), aber das Material reicht zur Entscheidung nicht.

Es scheint, daß mehrere differente Bevölkerungswellen die Urbesiedlung des Landes vermittelten, die stärksten Beziehungen bestehen über das Behringsmeer nach Nordostasien; das dürfte alles sein, was man einigermaßen sicher aussprechen kann. Als Hypothesen wurden Gedanken über Beziehungen von Amerika zu Spanien, zu Nordeuropa, zu der Südsee (Osterinseln)

ausgesprochen — es sind loseste Vermutungen. Auch das Alter der „ältesten" Skelettfunde ist noch strittig, scheint aber nicht weit in die Zeit des europäischen Diluviums zu reichen.

Literatur. *Zu 2a: Biometrica, a journal for the statistical Study of biological Problems (Pearson), Bd. 1 bis 8 ff.* — **Baur**, *Einführung in die experimentelle Vererbungslehre. Berlin 1911.* — **Goldschmidt**, *Einführung in die Vererbungswissenschaft. Leipzig 1911.* — **Haecker**, *Allgemeine Vererbungslehre, II. Aufl. Braunschweig 1912.* — **Johannsen**, *Elemente der exakten Erblichkeitslehre. Jena 1909.* — **E. Schmidt**, *Anthropologische Methoden. Leipzig 1888.* — **de Vries**, *Mutationstheorie. Leipzig 1903.*

Zu 2b: **Baur** *(s. o.).* — **Boas**, *Zur Anthropologie nordamerikanischer Indianer. Verh. Berl. Ges. f. Anthr., 1895.* — **Boas**, *Changes in bodily form of descendants of immigrants. Immigration Commission. 61. Congr. Docum., No. 208, Washington 1910, und 61. Congr., No. 208, 1911.* — **Bolk**, *De Lichaamslengte van Amsterdamsche Joden usw. Nederl. Tijdschr. Geneeskunde, 1910.* — **Engel**, *Das Knochengerüste des menschlichen Antlitzes. Wien 1850.* — **E. Fischer**, *Das Rehobother Bastardvolk usw. Jena 1913.* — **Fritsch**, *Ueber die Körperverhältnisse der heutigen Bevölkerung Aegyptens. Correspondenzbl. Anthr. Ges., 1899.* — **de Hutten-Czapski, Hubrecht, Dryepondt**, *Question de l'Acclimatement des Populations de race blanche (Inst. colon. internat. Rapp. Sess. Brüssel 1911).* — **Kohlbrugge**, *Der Einfluß des Tropenklimas auf die blonden Europäer. Arch. Rassen-Ges. Biol., 1910.* — **Niceforo**, *Anthropologie der nichtbesitzenden Klassen. Leipzig 1910.* — **Nyström**, *Ueber die Formveränderungen des menschlichen Schädels usw. Arch. Anthr., Bd. 27, 1900.* — **Radosavljevich**, *Professor Boas' new theory of the form of the head. Amer. Anthr., 13, 1911.* — **Ranke**, *Der Mensch. Leipzig 1912.* — **Derselbe**, *Die Schädel der altbayerischen Landbevölkerung. Beitr. z. Anthr. und Urgesch. Bayerns, 2, 1879, und andere.* — **Ridgeway**, *The Influence of Environment on Man. Journ. Anthr. Inst., 40, 1910.* — **Toldt**, *Untersuchungen über die Brachycephalie der alpenländischen Bevölkerung. Mitt. anthr. Ges. Wien, Bd. 40, 1910 und Altslavenschädel, ebenda, 1911.* — **R. Virchow**, *Crania americana. Berlin 1892.* — **Walcher**, *Entstehung von Brachy- und Dolichocephalie durch willkürliche Beeinflussung des kindlichen Schädels. Zentralbl. Gynäkol. 29, 1905 und „Weitere Erfahrungen". Münch. med. Wochenschr., 1911.*

Zu 2d: **Bean**, *Heredity of hair form among the Filipinos. Amer. Natur., 1911.* — **G. und Ch. Davenport**, *Heredity of Eye-colour in Man. Science, 1907.* — **Derselbe**, *Heredity of Hairform, of Hair colour, of Skin Pigment. Amer. Naturalist, 1908, 1909, 1910.* — **Fehlinger**, *Kreuzungen beim Menschen. Arch. Rassen-Ges. Biol., 1911.* — **Hurst**, *On the Inheritance of Eye-colour in Man. Proc. R. Soc., 80, 1908.* — **Kollmann**, *Rassenanatomie der Hand und die Persistenz im Rassenmerkmale. Arch. Anthrop., 28, 1902 und mehrere andere Arb.* — **v. Luschan**, *Ausgrabungen v. Sendschirli, Berlin 1893 bis 1911, und Archiv für Anthropologie 19, 1890.* — **Pearson**, *Note on the Skin-colour of the Crosses between Negro and White. Biometr. 6, 1909.* — **Salaman**, *Heredity and the Jew. Journ. of Genetics, 1, 1911.*

Zu 5a: **Deniker**, *The Races of Man. London 1900.* — **Fritsch**, *Entwickelung und Verbreitung der Menschenrassen. Zeitschr. f. Ethnol., 42, 1910, S. 580, Disc. S. 924.* — **Sergi**, *L'uomo. Turin 1911.* — **Stratz**, *Die Rassenschönheit des Weibes. Stuttgart 1901.* — **Wieth-Knudsen**, *Der Mensch. Arch. Rassen-Ges. Biol., 9, 1912.* — **Wilser**, *Rassengliederung des Menschengeschlechts Polit.-anthr. Rev., 5, 1906. Die naturwissenschaftliche Bezeichnung der Menschenarten. Ber. Nat. Aerzte. Vers. Karlsruhe 1911. Rassen und Völker. Leipzig 1912.*

Zu 5b: **Classen**, *Die Völker Europas zur jüngeren Steinzeit. Stuttgart 1912.* — **Deniker**, *Les races de l'Europe, I. Assoc. franç. p. l'av. des sc., 1899; II, ebenda, 1908; ebenso Huxley Mem. Lect., 1904.* — **Hirth**, *Die Indogermanen, Straßburg 1907 (hier linguist. ethn. etc. Lit., ebenso in Zeitschr. Mannus: Kossina u. a.).* — **Krattschek**, *Menschenrassen Europas. Polit. anthr. Rev., 1903.* — **Ripley**, *The Races of Europe, New York 1899 und Bibliography of the Anthr. Literature of Europe (sehr ausführlich!), Boston 1899.* — **Sergi**, *Europa. Torino 1908.* — **Schliz**, *Beiträge zur prähistorischen Ethnologie. Prähist. Zeitschr., 1912.* — **Wilser**, *Die Germanen. Eisenach 1903.*

Zu Vorderasien: **v. Luschan**, *s. o., dann Reisen in Lykien, Wien 1889.* — **Derselbe** *(betr. Judenfrage), Arch. Rassen u. Ges. Biol., 1907.* — **Derselbe**, *The early inhabitants of Western Asia. Journ. Anthr. Soc., 1911.* — **Weissenberg**, *Arch. Anthr., 1909. Zeitschr. Ethnol., 1909.* — **Fischberg** *(betr. Anthr. d. Juden), Amer. Anthrop. 1902 p. p.*

Zu Nordafrika: **Chantre**, *Recherches anthr. en Egypte. Lyon 1904.* — **Flinders Petrie**, *The races of early Egypte. Journ. Anthr. Instit. 1901.* — **Oetteking**, *Kraniolog. Stud. an Altägyptern. Arch. Anthr., 1909.* — **Elliot Smith**, *Zahlreiche Aufsätze in The archäol. Survey of Nubia. Reports Cairo, 1910. Bull. 1908/10.* — **Stahr**, *Die Rassenfrage im antiken Aegypten. Berlin 1907.* — **Thomson and Randall-Maciver**, *The ancient Races of the Thebaid. Oxford 1905.*

v. Behr, *Metrische Studien an 152 Guanchenschädeln. Stuttgart 1908.* — **Lissauer**, *Archäologische und anthropologische Studien über die Kabylen. Zeitschr. Ethn., 1908.* — **Mehlis**, *Die Berberfrage. Arch. Anthr., 1909.*

Zu Uebriges Afrika: **Czekanowski**, *Forschungen im Nil-Kongo-Zwischengebiet, Bd. III. (Ergebn. d. deutsch. Zentr.-Afr.-Exp.) Leipzig 1911.* — **Fritsch**, *Die Eingeborenen Südafrikas. Breslau 1872.* — **v. Luschan**, *The racial affinities of the Hottentots. Rep. hist. and S. Afr. Assoc. London 1907.* — **W. Schmidt**, *Stellung d. Pygmäenvölker usw. Stuttgart 1910.*

Zu Malayischer Archipel und Südsee: **Hagen**, *Unter den Papua. Wiesbaden 1899.* — **Derselbe**, *Gesichtstypen ostasiatischer und melanesischer Völker. Stuttgart 1906.* — **Derselbe**, *Die Orang.-Kubu auf Sumatra. Veröff. städt. Völkermus. Frankfurt a. M. 1909.* — **Klaatsch**, *The Skull of the Austr. Aboriginal. Rep. Path. Lab. N.S.-Wales 1908.* — **Derselbe**, *Reiseberichte. Zeitschr. Ethnol., 1905 bis 1907.* — **Martin**, *Inland-*

stämme der malayischen Halbinsel. Jena 1906. — **Moszkowski,** *Auf neuen Wegen durch Sumatra. Berlin 1909 und Zeitschr. Ethnol., 1908* — **P. und F. Sarasin,** *Die Weddas von Ceylon usw. Wiesbaden 1892.* — **Derselbe,** *Versuch einer Anthropologie der Insel Celebes. Wiesbaden 1906.* — **W. Schmidt,** *Die Mon-Khmer-Völker. Braunschweig 1906.* — **Thilenius,** *Ethnologische Ergebnisse aus Melanesien. Abh. K. Leop.Car. Akad., 1908 (s. auch die Werke von* **Finsch, Kraemer, A. B. Meyer, Parkinson, Schelling, Volz** *u. a.).*

Zu Asien (außer Vorderasien): **Bälz,** *Die körperlichen Eigenschaften der Japaner. Mitt. zur Natur- und Völkerkunde Ostasiens. Jahrg. 1880—1884, 1888.* — **Derselbe,** *Die Riu-Kiu-Insulaner, Aino usw. Korrespondenzbl. Anthr. Ges., 1911.* — **E. Schmidt,** *Beitr. zur Anthr. Südindiens. Arch. Anthr., 1910.*

Zu Amerika: **Ehrenreich,** *Anthropologische Studien über die Urbewohner Brasiliens. Braunschweig 1897.* — **Hrdlicka,** *Skeletal Remains suggesting or attributed to early man in North America. Smith. Inst. Bul. 33, 1907. Contributions to the Anthropologie of central and Smith Sound Eskimo. Am. Mus. of Nat. Hist., 1910.*

E. Fischer.

Rassenmorphologie.

I. Allgemeines. Vergleichend morphologische und rassenanatomische Bedeutung. II. Spezielles. 1. Muskelsystem. 2. Verdauungsapparat: Lippen, Zunge, Uebriges. 3. Respirations- und Zirkulationsapparat. 4. Urogenitalapparat. 5. Sinnesorgane: a) Nase. b) Auge. c) Ohr.

I. Allgemeines.

Die „Einteilung" der Gesamtanthropologie (s. Bd. I, S. 483) ergab als zweiten Teil die „spezielle oder systematische Anthropologie". Sie hat vom anthropologischen Standpunkt aus Anatomie, Physiologie, Pathologie der menschlichen Varietäten und bis zu gewissem Grade der Primaten überhaupt zu untersuchen. Da es sich nicht nur um registrierendes Beschreiben, sondern um vergleichendes Studium, um Erforschung des Werdeganges neben der fertigen menschlichen Form handelt, ist der Name Morphologie für den ersten, den anatomischen Teil, gerechtfertigt (Rassenphysiologie und Rassenpathologie s. in den folgenden Artikeln). Die Rassenmorphologie durchforscht also sämtliche Organsyteme des Menschen systematisch nach Sonderbildungen, die den Werdegang des Menschen erklären helfen könnten, oder seine systematische Stellung innerhalb der Primaten, oder endlich die einzelne menschliche Gruppen charakterisieren. Die Ergebnisse der vergleichend anatomischen, paläontologischen, entwickelungsgeschichtlichen und systematisch-zoologischen Primatenforschung sind ihr unentbehrlich.

Das Arbeitsprogramm ist in den Organsystemen, die der Anatom unterscheidet, gegeben. Dadurch, daß deren Durchforschung dem Anthropologen außerordentlich ungleiche Ausbeute liefert, ist es gekommen, daß einzelne mit besonderen anthropologischen Methoden und sehr intensiv bearbeitet sind (Schädel, Haar, Haut usw.) — aber das ist ohne jede prinzipielle Bedeutung. Rein aus diesen praktischen Gründen sind aus folgender zusammenfassenden Darstellung derartige umfängliche Kapitel unter besonderen Stichworten an andere Stelle gesetzt worden. Die Organsysteme sind die folgenden: 1. Skelettsystem: scheidet hier aus, s. den Artikel „Schädellehre". 2. Muskelsystem. 3. Verdauungs-, Atmungs-, Kreislauf-, Harn-, Geschlechtsapparate. 4. Haut und Hautgebilde: scheidet hier aus, s. die Artikel „Haar" und „Haut". 5. Gehirn und Sinnesorgane, Gehirn s. den Artikel „Gehirn". 6. Gesamtkörperform (Größe, Proportionen, Physiognomie usw.): scheidet hier aus, s. den Artikel „Körperformen des Menschen".

Die Ergebnisse aller dieser morphologischen Studien sind nach vielfacher Richtung interessant. Zunächst zeigen sie, daß morphologisch der Mensch in seiner Gesamtheit voll und ganz ins Primatenreich gehört (s. Bd. I, S. 475); überall, an allen Organsystemen, finden sich entweder in der Entwickelungsperiode oder im ausgebildeten Zustand eine Menge Formeigentümlichkeiten, die nur durch Vergleichung mit werdenden oder fertigen Zuständen bei Halbaffen und Affen verstanden, stammesgeschichtlich nur auf solche zurückgeführt werden können. Wie überall herrscht auch beim Menschen ein sehr starkes Variieren aller dieser Bildungen, man möchte ziemlich allgemein rezessive, mittlere und progressive Varianten dabei annehmen.

Neben diese stammesgeschichtliche Forschung tritt dann die rassenvergleichende. Da ist das Resultat von großer Bedeutung, daß es irgendwelche deutlich und einwandfrei qualitative Rassenunterschiede nicht gibt. Morphologische Merkmale, die nur einer einzigen Rasse zukämen, ließen sich nicht feststellen. Alle die zahlreichen Variationen am menschlichen Körper, deren Schwankungen nach Zahl, Form, Größe sehr bedeutend sind, kommen bei allen Rassen vor, was sie aber rassenmäßig charakterisiert, ist die Häufigkeit dieses Vorkommens. Das ist rassenmäßig verschieden! Eine Variante, z. B. ein überzähliger Muskel,

eine überzählige Knochennaht am Schädel, die besondere Form der Anordnung von Papillen oder die Furchen auf einem Backzahn oder Pigment in einem Hautbezirk usw. ist bei einer Rasse extrem selten, in 1 oder 2% oder gar nur in 0,1 oder 0,2% der Fälle vorhanden, bei der anderen vielleicht an 80 bis 90 oder 95% der Individuen festzustellen; so kam man dazu, von der „Mongolen“falte (am Auge), vom „Inka“bein usw. zu sprechen. Bei weitaus den meisten Variationen sind allerdings die Häufigkeitsunterschiede lange nicht so groß, betragen nur wenige Prozente — es gibt alle Uebergänge. Die Frage, wie sich nun alle diese Variationen bei den einzelnen Rassen kombinieren, ob man da bestimmte etwa phylogenetische Richtungen des Gesamtvariierens wird feststellen können, ist noch nicht entschieden.

Bartels (1904) hat am Schädel in dieser Richtung, Loth (s. unten) an der Muskulatur einen ersten kleinen Vorstoß gemacht — zusammenfassende, zielbewußte Arbeit fehlt noch. Man lebt im allgemeinen in der Vorstellung, daß es auch auf diesem morphologischen Gebiete „primitive“ Rassen gibt und legt nun trotz Bartels Warnung etwa die „kulturelle“ Stufenleiter der menschlichen Gruppen als Einteilung an — ein paar Stichproben haben gelegentlich an Negern gezeigt, daß einige primitive, d. h. regressive, phylogenetisch ältere Variationen bei ihnen häufiger vorkommen als bei uns — das ist richtig — aber einer Verallgemeinerung fehlt noch die exakte Grundlage. Ja, neuere Untersuchungen zeigen, daß bezüglich auffälliger Unterschiede in der Häufigkeit zahlreicher Variationen (+ und —) wohl die Mongolen (als deren Vertreter nur die Japaner untersucht sind) die deutlichste Sonderstellung einnehmen — auch bezüglich mancher primitiver Merkmale — und daß ihr Hirnbau etwa primitiv ist, wird niemand behaupten wollen.

Endlich scheinen auch manche dieser morphologischen Variationen bei ganz kleinen, aber ethnisch und damit für die Fortpflanzung einigermaßen geschlossenen Gruppen, besonders häufig (oder selten) vorzukommen, so daß man da an sporadisches Auftreten und dann erfolgende Vererbung denken muß; da würde dann jede phylogenetische Bedeutung wegfallen!

Im ganzen kann man sagen, zur Abrundung der morphologischen Forschung, zu einem wirklichen Bild, zur wissenschaftlichen Verarbeitung, fehlt noch sehr viel, dagegen sind die Ergebnisse der Einzelforschung, unsere tatsächlichen deskriptiven Angaben außerordentlich reich. — Auf künstlich hervorgebrachte Formen soll beim Artikel „Körperformen des Menschen“ eingegangen werden.

II. Spezielles.[1])

1. Das Muskelsystem. Gründlichere Untersuchungen über Unterschiede in der Anordnung und einzelnen Ausbildung der menschlichen Muskeln in den einzelnen Rassen hat zuerst v. Chudzinski (1873—1898) angestellt und zwar an Negerleichen. Nach längerer Pause sind dann in neuerer Zeit von japanischen Anatomen an ihrem Material, dann an Negern, Papua, Hottentotten usw. solche Studien unternommen worden. Loth (1912), der selbst dabei beteiligt war, gibt eine vorzügliche, die ganze Literatur bearbeitende kritische Darstellung, auf die jeder Interessent verwiesen werden muß. — Gerade für die Muskulatur sind ja nun unsere vergleichend anatomischen Kenntnisse sehr groß, die meisten Muskeln sind nach phylogenetischen Gesichtspunkten durch die ganze Wirbeltierreihe durchgearbeitet, so daß wir auftretende Variationen ziemlich gut beurteilen können. Weiter bringt es unser anatomischer Präpariersaalbetrieb mit sich, daß wir über die Muskelvarietäten des Europäers ebenfalls im allgemeinen sehr gut unterrichtet sind, es liegen darüber zwei spezielle Lehrbücher vor: Testut (1884 und Le Double (1897). Die ersten systematischen Präpariersaal-Statistiken mit anthropologischem Ziele hat Schwalbe unternommen. Trotzdem konnte Loth zeigen, daß 10 Muskelvarietäten für den Europäer nicht beschrieben sind, die doch ohne Zweifel vorkommen. Ebenso besteht bezüglich der Gesichtsmuskulatur trotz Ruges (1887) vorzüglicher vergleichender Bearbeitung und H. Virchows (1908) neueren Angaben noch keine Einigkeit.

Loth stellt alle Variationen zusammen; wir können die Sektionsergebnisse von etwa 100 Negern, 100 bis 900 Japanern (wechselnd für einzelne Muskelgruppen) mit den europäischen vergleichen, von allen anderen Rassen liegen Angaben über 2 oder 3 Individuen (Chinesen 6, Melanesier 4, Hottentotten und Buschmänner 2, Australier 1 oder 2, dürfte alles sein!) oder gar keine vor! — So beschränkt sich Loth mit Recht auf die Vergleichung von Europäer, Japaner und Neger. Da zeigt sich, daß in der Häufigkeit der Muskelvariationen sehr starke Schwankungen festzustellen sind. Loth stellt in ganz ausführlicher Tabelle die einzelnen Ergebnisse zusammen. Daraus soll nur die prozentuale Häufigkeit einiger weniger Merkmale entnommen werden. So besteht z. B. eine Inscriptio tendinea im Musculus sterno-hyoideus bei Europäern in 1,5%, bei Negern in 6,6% und Japanern in 70,7%; ein Sternalis tritt auf bei Europäern in

[1]) Im folgenden soll eine kurze Uebersicht der Ergebnisse versucht werden.

4,1%, Negern in 12%, Japanern in 14,8%. In diesen und noch sechs anderen Fällen ist stets die Reihenfolge Europäer-Neger-Japaner; dabei bleiben sich, wie man an Kurven am besten sieht, Neger und Europäer näher, die Japaner weichen mehr ab. Dabei sind die betreffenden Variationen primitive, so daß man sagen kann, die Häufigkeit des Auftretens primitiver Muskelvarietäten ist im allgemeinen bei Japanern am größten, dann kommen Neger, dann Europäer. Nur für einige Variationen an der unteren Extremität — plantaris, peroneus tertius, flexor digitorum brevis der 5. Zehe — ist der Japaner am wenigsten oder zweitwenigsten regressiv von den dreien. Eine Erklärung ist dafür nicht zu geben. — Neben der ziffernmäßig zu fassenden Häufigkeit solcher Einzelvariationen betont dann Loth die Erscheinung, daß eine Anzahl Muskeln, vor allem die Gesichtsmuskulatur, in ihrem Gesamtverhalten sich beim Neger primitiv erzeigen — Einzelheiten müssen hier übergangen werden — so daß man im ganzen den Neger bezüglich seiner Muskulatur als primitiver denn den Europäer bezeichnen muß.

Auch die Gesichtsmuskulatur der untersuchten Chinesen, auch die der Melanesier ist recht primitiv gewesen (Literatur bei Loth).

Im Zusammenhang mit der Besprechung des Muskelsystems sei hier erwähnt, daß die Plantaraponeurose der Primaten ebenfalls durch Loth (1908) eine schöne Bearbeitung erfahren hat, sie wird durch die ganze Primatenreihe verfolgt, ihre Zweiteilung in einen tibialen und fibularen Strang erwiesen.

2. Verdauungsapparat. Die Begrenzung des Einganges zum Verdauungskanal, zum Mund, die Lippen sind anthropologisch sehr bedeutungsvoll. Die Lippen aller Affen sind dünn, kaum nach außen aufgeworfen, nur selten schleimhautartig rot gefärbt (s. Friedenthal, l. c.). Beim Menschen ist die Lippe nur beim Europäer leuchtend rot, bei allen gefärbten Rassen matter und bei den dunklen Rassen mehr livide, braunrot oder lilarot, gelegentlich ganz dunkel. Die Breite des „Lippenrot" und seine Form wechselt. Beim Europäer gibt es Lippen, an denen man bei ruhig geschlossenem Mund nur 2 bis 3 mm davon sieht, ja bei Greisen mit geschwundenen Zähnen und Zahnfortsätzen der Kiefer ist die Lippe eventuell eingekrempelt, unsichtbar. Bei vielen Stämmen, manchen Indianern, Wedda, manchen Südseestämmen, ist die Lippe nur dicker als bei uns, nicht aber stärker evertiert. Dagegen bei anderen, vor allem Negern, ist sie sehr stark aufgeworfen, wulstig. Anthropologisch mißt man die Höhe (also senkrecht) der beiden Lippen bei ruhig geschlossenem Mund an der Stelle der größten Höhe, d. h. meistens neben der Mittellinie. Diese Höhe kann bis gegen 30 mm betragen. Die Grenze der Lippenschleimhaut gegen die Haut verläuft an der Oberlippe meist in Form eines sogenannten Amorbogens, also in der Mitte eingeknickt, gelegentlich aber auch gleichmäßig nach oben konvex (Statistik scheint darüber zu fehlen). — Diese Grenzlinie kann sich als Leiste markieren (Fischer, 1913, Hauschild, 1911, „Lippenleiste"). — Auch die Vererbung der individuellen Lippenform hat man studiert, so die berühmte dicke Lippe der Habsburger (Haecker, Zeitschrift für induktive Abstammungslehre 1911 und Strohmeyer, Archiv für Rassen- und Gesellschaftsbiologie 1911 und 1912).

Die Zunge interessiert anthropologisch bezüglich der Anordnung der auf ihr befindlichen Papillen, und zwar die Papillae vallatae. Wir verdanken hier Untersuchungen zuerst Stahr, dann Hopf und Edzard, Grabert, Kunitomo, Zuckermann, von älteren Angaben, Giacomini u. a. abgesehen. Danach kommt die Anordnung jener Papillen in V-Form unter 64 Negern bei 31%, unter 130 Japanern bei 32%, unter 100 Europäern bei 37% (unter 12 Melanesiern bei 42%) vor, je die zu 100 fehlenden Prozent haben Y- und T-Form. Da das Verhalten der anthropoiden Affen noch nicht völlig klar liegt, sollen keine Schlüsse gezogen werden. Der Winkel, den die beiden Aeste miteinander bilden, beträgt beim Europäer etwa 110°, beim Japaner etwa 115°, beim Neger etwa 130° und beim Melanesier etwa 140°.

Die Gaumenleisten hat Retzius (1906) näher untersucht, ihre allmähliche Reduktion beim Menschen gezeigt, Rassenuntersuchungen fehlen. Von Magen und Darm und ihren Anhängen ist anthropologisch wenig bekannt; Bloch (1904) stellt die Angaben zusammen, wonach der menschliche Darm 8,56 m, der Dünndarm 7,03 m mißt; Japaner haben einen längeren, Neger einen kürzeren Darm als Europäer, doch ist die Zahl der Untersuchten für jene ziemlich gering. — Leber und Milz sollen beim Neger etwas leichter sein als beim Europäer. Die Leber hat Ruge für den ganzen Primatenstamm einer musterhaft gründlichen vergleichend anatomischen Bearbeitung unterworfen, ihre Lappung, die Ausbildung und Entstehung der Furchen und Lappen klargestellt, doch muß bezüglich der Einzelheiten auf das Original verwiesen werden (das letzte Kapitel enthält die Variationen beim Menschen).

3. Respirations- und Zirkulationsapparat. Rassenanatomisch wichtig geworden ist die Untersuchung der Morgagnischen Taschen (Ventriculus laryngeus) des Kehlkopfes, weil schon ältere Arbeiten

(Gibb, Giacomini u. a.) darauf hinweisen, daß jene Taschen beim Neger geräumiger seien und weiter nach oben reichten, also den Verhältnissen mancher Affen näher kämen, wo die Kehlkopftaschen gelegentlich weit nach oben reichen, als Resonanzräume dienen. Alle diese Verhältnisse hat zuletzt Bartels (1904) zusammengestellt und durch eigene Untersuchungen erweitert (Neger); dann hat jüngst Zuckermann (1912) einige Befunde an Melanesierkehlköpfen angegeben. — Es scheint, daß gewisse primitive Verhältnisse, wie Vergrößerung der Taschen, kräftige Entwickelung der Fovea centralis usw. beim Neger gehäuft auftreten, doch fehlen noch umfassende Untersuchungen.

Ueber die Luftröhre, die Lungen und die Pleuren liegen rassenanatomische Untersuchungen nicht vor, nur auf die schönen Beiträge Ruges (1892 und 1912) zur Primatenmorphologie sei hingewiesen, die er in der Bearbeitung der Pleuragrenzen bei Affen geliefert hat. Er zeigt, wie sich phylogenetisch die pleurale Strecke der Wirbelsäule verkürzt zugunsten der peritonealen, also ein Verkürzungsprozeß des Brustkorbes, der durch seine Zunahme in querer Richtung ausgeglichen wird.

Bezüglich des Zirkulationsapparates ist auf die im Primatenstamm allmählich sich ausbildende mit der genannten Pleuragrenzenverschiebung zusammenhängende Veränderung der Lage der Herzlängsachse von der senkrechten in die mehr horizontal dorsoventral verlaufende Lage hinzuweisen, die ebenfalls Ruge (1892) festgestellt hat.

4. Urogenitalapparat. Zwei Erscheinungen sind hier als besonders auffällig zu registrieren. Die Buschmänner haben eine auch in nicht erigiertem Zustand

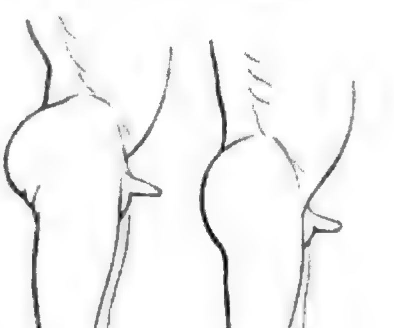


Fig. 1. Umrisse nach Seiners Photographie (1912).

horizontale Lage des Penis, der kurz, dick, gerade nach vorn steht, wie v. Luschan (1906) und Pöch (1911) kurz melden, Seiner (1912) abbildet. Aehnliches ist sonst nirgendsher bekannt, eine morphologische Untersuchung fehlt.

Die Buschmann-, aber mehr noch die Hottentottenfrauen haben eine exzessive Verlängerung der kleinen Schamlippen und zum Teil der Clitoris; man nennt die Bildung Hottentottenschürze. Die beiden kleinen Schamlippen sind je zu 5 bis 6 und mehr Zentimeter Länge entwickelt, und hängen als Lappen zwischen den ziemlich karg entwickelten großen Lippen heraus. Es ist noch immer nicht einwandfrei festgestellt, ob es sich um eine natürliche Bildung oder eine absichtliche künstliche Deformation handelt; Bartels-Ploß stellt die verschiedenen Angaben zusammen. Es sei daran erinnert, daß auch bei einer Affenart (Ateles) Aehnliches vorkommt (vgl. E. Fischer, 1898). An beiden eben genannten Stellen ist auch über Variationen der Lage der weiblichen Genitalien das Nötige zu finden.

Eine genauere primatenvergleichende Morphologie des Urogenitalapparates fehlt noch.

Friedenthal (1910) weist dabei auf die Wichtigkeit einer vergleichenden Spermienuntersuchung hin, auch in diesem Handbuch Bd. 1, S. 475 ist das dargelegt. Zu dem dort Gesagten ist dazuzufügen, daß inzwischen Retzius (1911) Schimpansenspermien untersucht hat, sie ähneln denen des Menschen mehr als denen des Orang! Nun sind von den Anthropoiden nur noch die des Gorilla zu untersuchen.

5. Sinnesorgane. Es ist fast selbstverständlich, daß anthropologisch über den nervösen Apparat und den sonstigen spezifischen Aufbau der einzelnen Sinnesorgane selbst fast nichts auszusagen ist, vielmehr anthropologische Unterschiede mehr an den Außenwerken, also an den Hilfs- und Schutzorganen der Sinneswerkzeuge gefunden werden. Die Ausbildung der Tastleisten an Hand und Fuß ist in dem Artikel „Haut (anthropologisch)" nachzusehen. — Bezüglich des Geschmacksinnes ist auf die Anordnung der Papillae vallatae zu verweisen (s. oben). — So bliebe hier Nase, Auge und Ohr zu behandeln.

5a) Die Nase. Die Nase ist anthropologisch von besonderer Wichtigkeit und zwar ihre äußere Form.

Der Aufbau der inneren Nase ist morphologisch für die Primaten durch die Rückbildung der Muscheln charakterisiert. Man bringt die Reduktion der Riechmuscheln und damit des Riechvermögens bei Affen und Mensch in kausalen Zusammenhang mit der Ausbildung des Intellektes und mit der Bevorzugung des Gesichtssinnes. Für diese stammesgeschichtliche Veränderung gibt es beim Menschen (die Affen sind in dieser Beziehung sehr wenig untersucht) deutliche Hinweise in Form der überzählig auftreten-

den vierten Muschel, sowie embryonaler und anderer Bildungen (vgl. **Wiedersheim**, Bau des Menschen, l. c.).



Fig. 2. Semnopithecus nasicus. $^2/_3$. Nach Wiedersheim.



Fig. 3. Rhinopithecus Roxellanae. $^2/_3$. Nach Wiedersheim.

Die stammesgeschichtliche Entstehung der spezifisch menschlichen „äußeren" Nase ist unbekannt; **Friedenthal** (l. c.) macht darauf aufmerksam, daß die typischste Menschennase, die prominente, gebogene (Adlernase und ähnliche), dem Strom der Atemluft einen zuerst senkrecht aufsteigenden und dann stark gebogenen Verlauf vorschreibt: wenn die Nasenlöcher nach vorn sehen, geht der Luftstrom fast gerade durch und wird weniger von Staub usw. filtriert — ob das wirklich genügend Selektionswert für die Entstehung der äußeren Nase hatte, bleibt fraglich. — Uebrigens ist doch auch anthropologisch interessant, daß noch an anderer Stelle im Primatenstamm eine „äußere" Nase gebildet wurde, beim sogenannten „**Nasenaffen**" (Semnopithecus nasicus), Nasalis larvatus. **Wiedersheim** (1901) zeigt am Aufbau des Knorpelgerüstes, daß es sich um eine selbständige Entstehung handelt, die nichts mit der menschlichen zu tun hat. Dasselbe gilt wahrscheinlich von einer zweiten, allerdings geringer entwickelten Affennase, der des Rhinopithecus Roxellanae (s. **Wiedersheim**, 1901).

Beide haben äußere Nasen, die größer sind als die vieler Menschen. Eine genaue Untersuchung der Nasenknorpel der gesamten Affen nach feineren Unterschieden fehlt noch.

Rein **rassenanatomisch** ist die Nase ein äußerst prägnantes Rassenmerkmal. Wir können uns nicht vorstellen, daß sie wie etwa die Körpergröße, die Proportionen, vielleicht die Schädelform, von der Umwelt



Fig. 4. Mongoloide, negroide, australoide Nasenform. Nach **Topinard**.



Fig. 5. Negroide, australoide Nasenform. Nach **Topinard**.

direkt beeinflußt werden kann. Die Nasenform dürfte eines der allerbesten und sichersten Rassenmerkmale sein.

Man unterscheidet meist ziemlich unwissenschaftlich konvexe, gerade, konkave Formen nach dem Verlauf der Profillinie des Rückens. Aber es gibt innerhalb dieser Gruppen noch tiefgreifende Unterschiede und andererseits können Nasen, die eine gerade Rückenprofillinie zeigen, doch ihrem ganzen Bau nach zu konkaven gehören. Wichtig ist neben dem Verlauf des Nasenrückens dessen Breite, dann seine Erhebung über die Gesichtsfläche. Ist diese vorhanden und gar stark ausgebildet, so hat die Nase zwei seitliche Dachflächen, zu denen die Nasenrückenlinie eine Art Giebellinie darstellt; so ist es z. B. bei der Adler-, der Juden-, der geraden hocherhobenen Nase. Fehlt aber eine höhere Erhebung des Rückens, so stellt der Nasenabschnitt oberhalb der geblähten Flügel einen mit gerundeter Fläche nach vorn schauenden Wulst dar, so bei manchen Mongolen und Negroiden (s. Fig. 4). Sehr

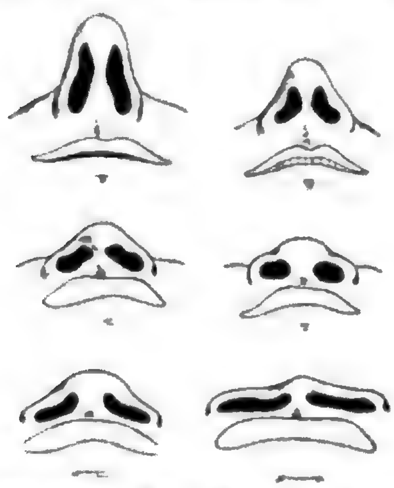


Fig. 6. Stellung der Nasenlöcher. Nach Topinard. Oberste Reihe: Europäer, mittlere: Mongolen, untere: Neger.

wichtig ist das Uebergangsgebiet von Nase und Stirn, die Strecke oben zwischen den Augenbrauen und wenig unterhalb davon; hier kann ein Winkel gebildet werden, so daß das Nasenprofil vom Stirnprofil vorspringt (z. B. Adlernase), oder trotz Erhebung eines Nasenrückens können beide ohne Knick ineinander übergehen (sogenannte griechische Nase) oder aber es bildet sich eine tiefe Einsenkung, die bei ganz fehlendem Nasenrücken flach und allseitig breit, bei vorhandenem eher eine quere und steil abfallende Rinne sein kann. — Endlich ist die Form und Stellung der Nasenlöcher, der Nasenflügel, des Septums zu beachten, endlich die Lage und Beziehung der Teile zueinander, also etwa Nasenspitze, Beschaffenheit des unteren Nasenabschnittes. Die Nasenlöcher sind bald schmal und eng, dabei sagittal gestellt (Fig. 6), bald rundlich, endlich queroval. Letzteres bei niederen breiten, ersteres bei hohen, schmalen Nasen. — Die starke Verschiedenheit der Größenverhältnisse der einzelnen Teile und ihre so außerordentlich verschiedene Formausgestaltung stellen der Beschreibung und Bewertung der Gesamtnase ganz besonders große Schwierigkeiten entgegen. So leicht es ist, von einer „negroiden", „australoiden", „mongoloiden" Nasenform, von Adlernase, Hakennase (Semitennase), gerade-prominenten, griechischen, Stumpfnase zu sprechen und sich darunter auch bestimmte Formen vorzustellen, so schwer ist eine genauere Analyse. Mit Messungen hat man ebenfalls besondere Schwierigkeiten, nur ein einziges Maß, die Breite, ist leicht zu nehmen. Man mißt mit dem Schiebezirkel (die Technik siehe im Artikel „Körperformen des Menschen"). Die Breite wird quer zwischen den prominentesten Punkten der Nasenflügel bei leichter Berührung der beiden Punkte gemessen. Die Länge ist schwieriger. Der untere Meßpunkt ist der einspringende Winkel zwischen unterem Rand der Nasenscheidewand und Vorderseite der Oberlippe. Als oberes Ende wird heute noch allgemein die Stirnnasennaht abgetastet. Von verschiedenen Seiten (Baelz, Fischer, H. Virchow) wird auf das Mißliche dieses Punktes hingewiesen, bei manchen Mongolen, Hottentotten u. a. mit ganz flacher Glabella ist der Punkt nicht zu finden. Die „Nasenlänge" ist also etwas anderes als das, was man im täglichen Leben dafür ansieht. — Als Tiefe der Nase wird die Erhebung der Spitze über der Lippenfläche gemessen, als Rückenlänge die Entfernung der Spitze von der Stirnnasennaht. Aus der Länge und Breite wird ein „Nasenindex" (am Lebenden!) berechnet, indem man die Breite in Prozenten der Länge ausdrückt (Topinard, Ranke). Man unterscheidet: schmalnasig (leptorhin), mittelbreitnasig (mesorhin) und breitnasig (platyrhin) — die Ziffern und Begriffe sind von den parallelen am Schädel wohl zu unterscheiden.

Ueber die Verteilung der Nasenformen auf der Erde wissen wir noch sehr wenig. Es sind nur ganz ungenügende Angaben vorhanden. Nach Topinard sind die Europäer im ganzen schmalnasig (Index im Mittel 63 bis 69), die Mongolen und Indianer mittelbreitnasig (Index im Mittel 69 bis 81), die Neger, Papua, Australier breitnasig (Index im Mittel 88 bis 109). Am breitnasigsten sind Australier und Tasmanier; da ist, mit Indices über 100, die Nase breiter als lang.

Aber das gibt nur eine allgemeine Orientierung. Die Neger haben nach einzelnen Gruppen recht verschiedene Nasen, die Europäer noch mehr. Eine statistische Erhebung in Europa fehlt. Ranke hat —

sozusagen eine Stichprobe — das Vorkommen der Adlernase unter den Altbayern untersucht (es sind deren 7% deutliche und 21% mit Annäherung daran). — Kinder aus Rassen mit hohen schmalen Nasen sind meist breit- und stumpfnasig (Ranke), so ist der Nasenindex europäischer Kinder im Mittel etwa 107 (97% platyrhine z. B. in Bayern, während unter den Müttern deren nur 4%).

Bei Rassenmischung bilden sich nicht mittlere Nasenformen, sondern die elterlichen treten wieder auf, die Vererbung erfolgt nach den sogenannten Mendelschen Regeln, wenigstens nach einigen wenigen Untersuchungen, die darüber vorliegen; dabei scheint die hohe schmale Nase „dominant" gegen die negroide, die schmale typische Semitennase gegen die breitere, die lange gerade Nase gegen die breitere gebogene der askenasischen Juden (nach Salaman) — all das bedarf aber noch sehr der Prüfung (s. Fischer, 1912).

Endlich verlangt die Anthropologie der Nase noch eine eingehende Bearbeitung der Beziehungen der äußeren Nasenform zu ihrem anatomischen Substrat, den Knochen, Knorpeln und den Weichteilen. Dazu sind erst ganz geringe Ansätze da; Hovorka (1893) hat versucht, diesen Dingen nachzugehen und zuletzt hat H. Virchow (1912) an präparierten Neger- und Europäerköpfen (auch Mongolen) Vergleichungen angestellt und erfolgreiche erste Schritte unternommen; allgemeine Resultate können hier abschließend noch nicht vorgelegt werden.

5b) Das Auge. Im Gegensatz zu der in der Einleitung gesagten Tatsache bestehen am Auge auch rassenmäßige Unterschiede am nervösen Apparat. Das hängt vielleicht mit der stammesgeschichtlich späten Erreichung der definitiven Form des Primatenauges zusammen: erst die Affen haben eine Fovea centralis wie der Mensch, die Lemuren noch nicht. Jene Unterschiede sind gerade im Bereich des zentralen Feldes. Fritsch (1908) zeigt, daß zwar nicht scharfe Rassengrenzen, aber rassenmäßig sehr ungleiche Häufigkeit des Vorkommens gewisser Anordnungen der „Zapfen" der Netzhaut bestehen; deren gegenseitige Nähe, Menge der Zwischensubstanz, Zahl usw. schwankt sehr. So kommen z. B. bei Hottentotten und bei manchen indischen Stämmen besonders feine und dichtgestellte Zentralzapfen vor; Ostasiaten scheinen typisch flache Area und große Ausbreitung der stäbchenfreien Zone zu haben. Die feinsten Elemente (Zapfen) haben Hottentotten, dann manche Indier und Malayen, wenig feine die Melanesier, dann folgen die Europäer. — Besonders fein und regelmäßig sind die Elemente im Affenauge.

Weiter muß hier erwähnt werden, daß der Sehnerv der Japaner länger ist — rund um 1 cm — als der der Europäer, daher kommte es, daß der Augapfel dort weiter nach vorn tritt; Adachi (1904), der dies untersuchte, zeigte, daß der Augapfel weder größer noch die Orbita seichter ist, im Gegenteil, sie ist eher tiefer.

Viel auffälliger sind Rassenunterschiede in den vorderen Teilen des Auges und zwar bezüglich der Pigmentierung. Hauschild (1909) hat die mikroskopische Pigmentverteilung im Auge auf breiter vergleichender Basis bearbeitet. Es handelt sich bekanntlich um die Pigmentierung der Iris und der Conjunctiva. Beide sind bei den Säugetieren mit Pigment versehen. Wenn bei domestizierten Tieren das Hautpigment (Haarpigment) schwindet, so verliert sich meistens auch das der Conjunctiva; das sonst bei allen Säugetieren bräunliche, gelbgraue oder braunmarmorierte sogenannte „Weiße" des Auges wird dann wirklich weiß. Genau so ist es beim Europäer. Mikroskopisch-anatomisch verhält sich bezüglich des Pigmentes das Auge eines blau- (oder hellgrau-, hellgrün-) äugigen Menschen (nordische Rasse) zu dem aller anderen Menschen genau so wie das eines domestizierten hellen Tieres zur entsprechenden dunklen (Wild-) Form. Nur der Europäer hat eine „weiße" Beinhaut, beim Farbigen ist sie dunkel durch eingelagertes Pigment (Fischer [1905]; Steiner [1907] bildet Javaneraugen farbig ab).

Aber auch tiefere Teile sind bei Farbigen viel stärker pigmentiert, so das Corpus ciliare, vor allem aber die Iris.

Hauschild (1909) unterscheidet nach der Form der Irispigmentzellen drei Typen: der „negroide" hat plumpe, wenig verzweigte, klumpige Irispigmentzellen, der „mongoloide" zierliche, mit langen Fortsätzen, der „europäische", der diesem näher steht als dem negroiden, hat noch zierlichere Zellen, mit ganz langen dünnen Ausläufern und wenig Pigmentkörnchen.

Wenn das Pigment im Irisstroma ganz fehlt, erscheint bekanntlich die Regenbogenhaut blau oder hellgrau, mit ganz wenig Pigment grün-grau; mit etwas mehr hellbraun. Das scheinen typische Rassenunterschiede zu sein, jedenfalls fest vererbte Merkmale (s. Davenport und Hurst im Artikel „Rasse und Rassenbildung").

Was die geographische Verteilung der „Augenfarben" anlangt, kann zunächst gesagt werden: alle Rassen außerhalb Europas haben braune Augen — helleres Braun bis dunkelstes Schwarzbraun. — Bei allen kommt ganz sporadisch und selten ein helleres Auge vor, grünbraun — oder gar grün oder blau; das ist teils auf Mischung mit der helläugigen Rasse, teils auf individuelles Auftreten von partiellem oder richtigem Albinismus (vgl. den Artikel „Rassen-

pathologie") zurückzuführen. In Europa ist die Blauäugigkeit als typisches Rassenmerkmal der nordischen Rasse aufzufassen. Da wo sie sporadisch als geringer Prozentsatz in der braunäugigen Bevölkerung vorkommt, wie in Südeuropa, ist sie der Einwanderung jener Rasse zu danken. Mit größter Wahrscheinlichkeit gilt das auch von den festgestellten Blauaugen im Atlasgebirge, im alten Aegypten, in Vorderasien (blauäugige Juden z. B.) — immerhin kann die Möglichkeit nicht geleugnet werden, daß auch spontan (als Mutation) Blauäugigkeit an solchem Ort aufgetreten ist und sich erblich gehalten hat.

In Zentral- und Nordeuropa ist die Verteilung der Blauäugigkeit statistisch festgestellt (vgl. den Artikel „Rasseneinteilung").

Zur statistischen Erhebung, bezw. zur anthropologischen Untersuchung der Irisfarbe dienen „Farbentafeln". Zwar kann man schon mit den Farbworten brauchbare statistische Aufnahmen vornehmen; Broca hat dazu eine bestimmte und beschränkte Anzahl von Farbworten vorgeschrieben, um gleichmäßige Resultate zu erzielen, aber Farbtafeln sind viel besser. Früher war die Brocasche im Gebrauch (gelegentlich die Bertillonsche), sie sind in Buntdruck auf Papier gefertigt, aber weder lichtbeständig, noch sind die einzelnen Exemplare identisch.

Die heute allein als gut, ja vollkommen zu bezeichnende „Augenfarbentafel" ist von Martin (1903). Sie besteht aus einem kleinen Kästchen, darin 16 Glasaugen angebracht sind, die durch hellgraue, aus Aluminium gestanzte Lidspalten schauen und numeriert sind. (Zu beziehen von Hermann, Feinmechan. Werkstätte, Zürich. M. 80.) — Nr. 1 ist am dunkelsten, 1 bis 4 ist braun, 13 bis 16 ist blau. Danach wird man also die festgestellte Farbe einfach als Nummer angeben.

Ueber die Größe von Augapfel und Hornhaut macht Friedenthal (l. c.) einige vergleichende Angaben.

Die Hilfsapparate des Auges endlich bieten zunächst eine Reihe Variationen, die als Rudimente aus der Stammesentwickelung angesehen werden müssen, überzählige Muskeln, Drüsen usw., worüber Wiedersheims Bau des Menschen nachzusehen ist; nur eines soll erwähnt werden.

Am inneren Augenwinkel existiert bekanntlich eine kleine „halbmondförmige" Falte der Bindehaut, die Plica semilunaris, das Rudiment eines dritten Lides. In dieser Falte haben die Affen konstant ein Knorpelstückchen, beim Menschen tritt es nur inkonstant auf und zwar beim Europäer in 0,7%, beim Japaner (Adachi, 1906) in 20%, beim Aino (Masugi, 1912) in etwa 42%, beim Hottentotten (Bartels, 1911) in 35%, beim Neger (Giacomini) in 75%, (bei Herero Bartels [1911] ebenso 75%).

Dann kommt rassenanatomisch die Lidbildung sehr in Betracht. Die Form der Lidspalte wechselt sehr. Es gibt eng und weit geschlitzte („Schweinsaugen" und „Ochsenaugen" sagt Friedenthal). Die Form der Lidspalte ist „spindelförmig", so daß also beide Lidwinkel etwa gleich sind, oder aber „mandelförmig"; diese Form scheint in Zentral- und Nordeuropa selten, in Südeuropa und Nordafrika und ganz besonders in Vorderasien häufiger zu sein, doch fehlt jede Statistik. Die Verbindungslinie zwischen beiden Lidwinkeln kann horizontal gehen, „gerade" Augen, oder nach außen aufsteigen, „schiefe" Augenstellung; diese ist die viel seltenere. Sie darf nicht verwechselt werden mit der scheinbaren Schiefstellung, die durch Faltenbildung des Lides am inneren Augenwinkel bedingt ist. Hier kommt zunächst eine Art von Mißbildung vor, die als „Epicanthus" bezeichnet wird: Die Haut des Oberlides geht am inneren Augenwinkel mittels einer scharfen sichelförmigen senkrechtstehenden Falte kontinuierlich in die des Unterlides über, der freie konkave Rand der Falte schaut nach außen und deckt meistens den Tränenhöcker zu. Diese Bildung kommt als Rassemerkmal nicht vor, sie ist pathologisch.

Dagegen ist eine andere Faltenbildung, ebenfalls am inneren Augenwinkel als Rassemerkmal zu bezeichnen. Man nennt sie meist „Mongolenfalte". Sie ist bei sehr vielen mongolischen Gruppen, Ostasiaten, Kalmüken u. a., Eskimo, vielen Malayen als die Norm anzusprechen. Es ist eine Falte, die im Bereich der nasalen Hälfte des oberen Augenlides als lose Hautduplikatur so herabfällt, daß sie meist die Tränencarunkel und ein mediales Stück des freien Lidrandes zudeckt (Fig. 7).



Fig. 7. Mongolenfalte nach Baelz.

Nach außen verstreicht sie allmählich schräg nach oben. Sie gibt dadurch, daß sie vom nasalen Teil der Lidspalte von oben etwas zudeckt, dieser eine schräge, nach oben

„geschlitzte“ Form. Baelz hat gezeigt, daß es sich lediglich um überhängende Haut handelt, so daß man durch Hochziehen der Haut die Falte zum Verschwinden bringen kann. Ihre Genese hängt wohl mit der Flachheit der Glabellar- und Nasenwurzelgegend zusammen. Anatomisch genau dieselbe Bildung kommt vielfach bei Hottentotten und Hottentottenbastards vor. Bei letzteren kann man alle Größenstufen verfolgen, sehen, wie es auch Uebergänge zu epicanthusartigen Bildungen gibt (E. Fischer (1913) — hier auch die Literatur über das Hottentottenauge). Es sind gelegentlich nur leichte dünne Fältchen am medialen Augenwinkel.

Endlich beschreibt Adachi (1906a), daß im japanischen oberen Augenlid ein Fettpolster sitzt, das dem Europäer fehlt.

Vielleicht ist etwas Aehnliches im Oberlid von Hottentotten, wo öfters das Lid wulstig überhängt (Pöch, Fischer) — anatomische Untersuchung fehlt noch.

5c) Das Ohr. Anthropologisch kommt nur die Ohrmuschel in Betracht. Ihr stammesgeschichtliches Verständnis verdanken wir den grundlegenden Arbeiten Schwalbes (1891, 1895, 1897), doch können diese Verhältnisse hier nur angedeutet werden (vgl. neben Schwalbe Wiedersheims Bau des Menschen). Man muß als Vorfahrenstadium eine „Macacusform“ und eine „Cercopithecusform“ (Schwalbe) annehmen (Fig. 8), auf

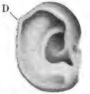


Fig. 8. Ohrmuschel des Cercopithecus. Nach Schwalbe.

die gewisse embryonale Formen des Menschenohres zurückweisen; der Rand ist bei jenen Formen noch nicht nach vorn umgekrempelt, nach oben und hinten findet sich eine Spitze, die ursprüngliche Säugetierohrspitze. Aus ihr wird das sogenannte Darwinsche Höckerchen (Fig. 8 bis 10).

Auf diese Formen gibt es beim Erwachsenen mannigfaltige Rückschläge als individuelle Varianten. Schwalbe (1895) hat eine gut durchgearbeitete Anleitung vorgelegt zu statistischen Erhebungen über die mannigfachen Formen der Ohrmuschelbildung. Insbesondere interessiert dabei das Fehlen oder Angewachsensein des Ohrläppchens, das gelegentlich als eines der berüchtigten „Verbrechermerkmale“ aufgefaßt wird (s. den Artikel „Sozialanthropologie“). Er gibt dort auch



Fig. 9. Menschliche Ohrmuschel „Cercopithecus-Form“. Nach Schwalbe.

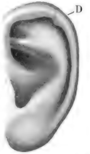


Fig. 10. Menschliche Ohrmuschel mit sehr deutlicher Darwinscher Spitze. Nach Schwalbe.

über die Meßtechnik der Ohrmuschel detaillierte Vorschriften. — Eine eigentümliche Art der Ohrmuschelbildung zeigen viele Buschmänner, das Ohr steht stark schief; der Rand ist stark zerknickt, anatomische Einzelheiten sind noch nicht gegeben (siehe Pöch und Fischer).

Literatur zu *I. Allgemeines:* **Bartels,** *Rassenunterschiede am Schädel. Intern. Monatsschr. Anat. u. Phys., 21, 1904.* — **Buschan,** *Menschenkunde. Stuttgart 1909.* — **Duckworth,** *Morphology and Anthropology. Cambridge 1904.* — **Frassetto,** *Lezioni di Antropologia. Bologna 1911 (noch im Erscheinen).* — **Friedenthal,** *Beiträge zur Naturgesch. d. Menschen, V. Jena 1910.* — **Guenther,** *Vom Urtier zum Menschen, 2 Bde. Stuttgart 1909. (Gehört insbesondere auch zum Abschnitt „Anthropogenese“ Bd. I, wo es leider im Lit.-Verz. ausgelassen wurde.)*

— **Leche**, *Der Mensch usw. Jena 1911.* — **Martin**, *Lehrbuch. Erscheint in Jena 1913.* — **Ranke**, *Der Mensch, 3. Aufl. Leipzig 1911.* — **Topinard**, *Éléments d'anthropologie générale. Paris 1885.* — **Wiedersheim**, *Der Bau des Menschen usw., 4. Aufl. Tübingen 1908.*

II. *S p e z i e l l e s.* *Zu* 1: **Le Double**, *Traité des Variations du système musculaire de l'homme. Paris 1897.* — **E. Loth**, *Beiträge zur Anthropologie der Negerweichteile. Stuttgart 1912.* — **Derselbe**, *Die aponeurosis plantaris in der Primatenreihe. Morph. Jahrb.* 38, *1908.* — **Ruge**, *Gesichtsmuskulatur der Primaten. Leipzig 1887.* — **H. Virchow**, *Gesichtsmuskeln und Gesichtsausdruck. Arch. f. Anat. u. Entwickelungsgesch., 1908.*

Zu 2: **Bloch**, *Bull. Soc. d'Anthr. Paris 1904.* — **Fischer**, *Das Rehobother Bastardvolk. Jena 1913.* — **Grabert**, *Arch. Anat. u. Phys. Anat. Abt.), 1910.* — **Hauschild**, *Korrespbl. Anthr. Ges., 1911.* — **Hopf und Edzard**, *Zeitschr. Morph. Anthr., 1910.* — **Kunitomo**, *Zeitschr. Morph. Anthr., 1912.* — **Retzius**, *Biol. Untersuchungen,* 13, *1906.* — **Ruge**, *Morph. Jahrb., 1902, 1906, 1907, 1910.* — **Stahr**, *Zeitschr. Morph. Anthr., 1906 und Jenaische Zeitschr. Naturw., 41, 1906.* — **Zuckermann**, *Zeitschr. Morph. Anthr., 1912.*

Zu 3: **Bartels**, *Zeitschr. Morph. Anthr., 8, 1904.* — **Ruge**, *Morph. Jahrb.,* 19, *1892 (Herz) und 44, 1912 (Pleurasäcke).* — **Zuckermann**, *Zeitschr. Morph. Anthr., 15, 1912.*

Zu 4: **Bartels-Ploss**, *Das Weib, 9. Aufl. Leipzig 1908.* — **E. Fischer**, *Morph. Arbeiten, Bd. 8, 1898.* — **Friedenthal**, *Beiträge zur Naturgeschichte des Menschen, Bd. 5. Jena 1910.* — **v. Luschan**, *Zeitschr. Ethnol., 1906.* — **Pöch**, *Korrespbl. Anthr. Ges., 1911.* — **Retzius**, *Biologische Untersuchungen N. F. Bd. 16. Stockholm 1911.* — **Seiner**, *Zeitschr. Ethnol., 1912.*

Zu 5*a*: **E. Fischer**, *Das Rehobother Bastardvolk. Jena 1913.* — **Friedenthal**, *Beiträge zur Naturgeschichte des Menschen, Heft 5. Jena 1910.* — **Hovorka**, *Die äußere Nase. Wien 1893.* — **Killian**, *Zur Anatomie der Nase menschlicher Embryonen. Arch. f. Laryngol., 1895 und 1896.* — **Ranke**, *Der Mensch. Leipzig 1911.* — **Spurgat**, *Beiträge zur vergleichenden Anatomie der Nasen- und Schnauzenknorpel des Menschen und der Tiere. Morph. Arb., Bd.* 5, *1896.* — **Topinard**, *Éléments d'Anthropologie générale, Paris 1885.* — **H. Virchow**, *Die anthropologische Untersuchung der Nase. Zeitschr. Ethnol., 1912.* — **Wiedersheim**, *Bau des Menschen, Tübingen 1908, und Beiträge zur Kenntnis der äußeren Nase von Semnopithecus nasicus (mit Nachtrag). Zeitschr. Morph. u. Anthr., 1901.*

Zu 5*b*: **Adachi**, *Topographische Lage des Augapfels der Japaner. Zeitschr. Morph. Anthr., 7, 1904.* — **Derselbe**, *Knorpelstück in der Plica semilunaris der Japaner, ebenda, 9, 1906.* — **Derselbe**, *Mikroskopische Untersuchungen über die Augenlider usw. Mitteil. med. Fac. Tokyo, 7, 1906.* — **Bartels**, *Historisch-anthropologische Untersuchungen der Plica semilunaris usw. Arch. mikr. Anat., Bd. 78, 1911.* — **Baelz**, *Körperliche Eigenschaften der Japaner, Tokio.* — **Davenport**, *Heredity of Eye-Colour in Man. Science, 26. 1907.* — **E. Fischer**, *Pigment in der menschlichen Conjunctiva. Verhandl. anat. Ges., 19. Vers., 1905.* — **Derselbe**, *Das Rehobother Bastardvolk. Jena 1913.* — **Fritsch**, *Bau und Bedeutung der Area centralis. Berlin 1908.* — **Giacomini**, *Annotazione sulla anatomia del negro. V. Giorn. accad. med. Torino, 1882 und 1884 und Arch. Ital. de Biol., 1883.* — **Hauschild**, *Untersuchungen über die Pigmente im Auge verschiedener Menschenrassen usw. Zeitschr. Morph. Anthr., 12, 1909.* — **Hurst**, *Inheritance of Eye-colour in Man. Proc. Roy. Soc., 80, 1908.* **Martin**, *Einige neuere Instrumente usw. Anthr. Korrespbl., 1903, und künftiges Lehrbuch, Jena 1913.* — **Masugi**, *Plica semilunaris der Aino usw. Zeitschr. Morph. Anthr., 14, 1912.* — **Ranke**, *Der Mensch. Leipzig 1912.* — **Steiner**, *Augen der Javaner. Zeitschr. Morph. Anthr., 10, 1907.*

Zu 5*c*: **E. Fischer**, *Das Rehobother Bastardvolk. Jena 1913.* — **R. Pöch**, *Die Stellung der Buschmannrasse usw. Anthr. Korrespbl., 1911.* — **G. Schwalbe**, *Beiträge zur Anthropologie des Ohres. Virchow-Festschrift, 1891.* — **Derselbe**, *Das äußere Ohr. Bardelebens Handbuch d. Anat. Jena 1897.* — **Derselbe**, *Zur Methodik usw. über die Ohrformen usw. Arch. f. Psychiatrie, 1895.*

E. Fischer.

Rassenpathologie.

Rassenpathologie, d. h. eine systematische Untersuchung, wie viele und welche rassenmäßigen Unterschiede bestehen in der Häufigkeit des Vorkommens oder der Art des Ablaufs pathologischer Erscheinungen — im weitesten Sinne des Wortes, also Mißbildungen, Anomalien, Krankheiten — ist noch nicht unternommen worden. Das einzige, was wir da haben, sind ein paar, ziemlich beschränkte Gebiete erfassende Einzeluntersuchungen. Auch eine Familienpathologie, d. h. eine entsprechende Untersuchung über die einzelnen Familien, ist systematisch noch kaum in Angriff genommen, sie gehörte neben die (bezw. zur) Familienanthropologie (s. den Artikel „A n t h r o p o l o g i e").

Beim Versuch, Rassenunterschiede in der Häufigkeit von Krankheiten festzustellen, sind natürlich alle Infektionskrankheiten gesondert zu behandeln. Daß etwa bei bestimmten Völkern Syphilis oder Scharlach fehlt, ist kein Rassenunterschied, sondern in der geographischen Verteilung des betreffenden Krankheitserregers bedingt. Auch die Kropferkrankung gehört hierher. Auch daß wir Europäer bei Farbigen für zu ihnen gebrachte Krankheiten oft eine viel größere Disposition finden — so traten z. B. die bei uns gutartigen Masern, in die Südsee gebracht, als sehr mörderische Krankheit auf — oder daß umgekehrt Weiße gegen Malaria u. a. empfindlicher erscheinen als Schwarze, ist nicht als rassenmäßige Differenz erwiesen; all das kann mit der Annahme von erworbener

Immunität oder von der Mutter übertragener (nicht vererbter) Immunität oder von Schädigung der Widerstandskraft durch die Umwelt usw. erklärt werden. Ob es rassenmäßig verschiedene Disposition, Immunisierungskraft usw. gibt, wissen wir nicht.

Ob die Häufigkeit des Auftretens von Mißbildungen rassenmäßig verschieden ist, wissen wir nicht; auf die zahlreichen Arbeiten, die deren Vererbung — in jüngster Zeit auch den Vererbungsmodus, die Mendelschen Regeln — erweisen, kann hier nicht eingegangen werden. Auf eine Mißbildung soll eigens hingewiesen werden, den Pigmentmangel, „Albinismus" (s. Pearson u. a., 1911). Partieller Albinismus bedingt beim Neger Blondheit und Blauäugigkeit, so daß der Anthropologe die Erscheinung wohl kennen muß! Auch kommt beim Neger partieller Albinismus in dem Sinne vor, daß fleckenweise die Farbe fehlt, so daß eine schwarz und weißgefleckte Haut besteht („Elsternneger"). Die Häufigkeit bei verschiedenen Rassen ist nicht bekannt — eine scharfe Grenze zwischen partiellem Albinismus und rassenmäßiger Pigmentarmut läßt sich anatomisch nicht feststellen (es ist nur ein biologischer Unterschied). — Von anderen Mißbildungen sind anthropologisch die des Schädels wichtig, weil einzelne ihrer Formen Rassenformen ähneln können. Auch hier giebt es keine scharfe Grenze zwischen Varianten, die wir noch als normal bezeichnen, und wirklichen Mißbildungen (Nahtverschluß, Schaltknochen usw. — Turmschädel, Kahnschädel usw. — Microcephalie — und viele andere).

Dann ist die Hypertrichose, abnorme Behaarung, hier zu nennen (s. den Artikel „Haar"), ferner Mißbildungen am Unterende der Wirbelsäule, derart daß ein „Schwanz" entsteht. Schwanz gibt es rassenmäßig beim Menschen nicht, alle älteren Angaben beruhen auf Verwechslung mit sogenannten „Kostümschwänzen". Aber als individuelle Mißbildung können Weich- oder Hartgebilde schwanzartig über die Körperkontur an der betreffenden Stelle vorstehen, können eventuell Steißwirbel (oder wenigstens Chordareste) enthalten, also morphologisch einen Schwanz darstellen (der ja bei jedem menschlichen Embryo vorhanden ist).

Endlich ist der pathologische Zwergwuchs zu nennen, weil seine Kenntnis für die Pygmäenfrage wichtig ist (vgl. den Artikel „Rassen- und Rassenbildung") Pöch (1912).

Ueber wirkliche Rassenunterschiede auf pathologischem Gebiet ist wenig zu berichten. Daß die Gesamtkonstitution vieler sogenannter „Wilder" besser sei als die der Kulturmenschen, ist, wenn es wahr ist, durch die Lebensweise bedingt, gerade wie etwa die guten Zähne jener gegenüber unseren schlechten. Ob es wahr ist, daß Neger, wie man es in den Vereinigten Staaten beobachtet haben will, Operationen leichter aushalten, daß ihre Wunden rascher und leichter heilen, bleibe dahingestellt. Aber eine rassenmäßige verschiedene Häufigkeit mancher Konstitutionsanomalien scheint festgestellt; wenn Juden mehr Zuckerkrankheit und Tuberkulose haben, kann man das kaum auf irgendwelche Wirkungen der Lebensweise zurückführen, ebenso die Tatsache, daß Juden in viel höherem Prozentsatz geisteskrank werden, so in Preußen 1892 bis 1900 um dreieinhalbmal mehr als ihrer Bevölkerungsziffer entspricht (Theilhaber, 1911). Daß jenes Symptomenbild, das man als amaurotische familiäre Idiotie benennt, so gut wie nur bei Juden vorkommt, dürfte ziemlich sicher Rassenmerkmal sein (Salaman, 1911). Blind (1905) hat gezeigt, daß Italiener unter sonst gleichen Verhältnissen erheblich häufiger Unfallsneurosen erleiden als Deutsche. — Wie gesagt, das sind erst Stichproben; eine genauere Bearbeitung fehlt.

Literatur. *Es muß auf die Lehrbücher der Pathologie verwiesen werden („Vererbung", „Konstitutionsanomalien").* — ***Blind,*** *Rassenpsychologie und Unfallheilkunde. Monatsschrift f. Unfallheilk., 1905.* — ***Pearson,*** *Nettleship and Usher. A Monograph on Albinism in Man. London 1911.* — ***Pöch,*** *Zwergvölker und Zwergwuchs. Mitteilungen der geographischen Gesellschaft in Wien, 1912.* — ***Theilhaber,*** *Der Untergang der deutschen Juden. München 1911.* — ***Salaman,*** *Heredity and the Jew. Journ. of Genet. Cambridge 1911.*

E. Fischer.

Rassenphysiologie.

1. Allgemeines: Vererbung usw. 2. Spezielles: Physiologie: a) des Stoffwechsels, b) des Bewegungsapparates, c) des Nervensystems und der Sinne, d) der Fortpflanzung.

So wenig wie über die Pathologie der Rassen, existiert über deren Physiologie eine zusammenfassende Darstellung. Systematische Untersuchungen über Rassenunterschiede im Ablauf physiologischer Vorgänge fehlen ganz, es sind nur einzelne Beobachtungen vorhanden vor allem solcher, die man ohne Apparate usw. wahrnehmen kann. Ueber manche (Geburt z. B., dann Geschlechtsreife u. a.) liegen sogar sehr viele Angaben vor, aber die Mehrzahl davon bedarf sehr kritischer Aufnahme, sehr viele sind recht flüchtig und unbrauchbar. So können folgende Zeilen nur einen ganz flüchtigen Ueberblick geben.

1. Allgemeine Fragen. Die rassenmäßige Vererbung, also was von den sogenannten Rassemerkmalen wirklich vererbbar, was durch individuelle Einflüsse be-

dingt oder wenigstens modifiziert ist, ist noch wenig untersucht, es ist auch nur durch Beobachtung von Rassenkreuzung festzustellen, genau wie der Zoologe und Botaniker diese Fragen heute durch Kreuzungsexperimente zum Teil im großen Stil mit Erfolg in Angriff nimmt. Da diese Fragen aufs engste mit dem Problem der Rassenbildung überhaupt zusammenhängen, werden sie in dem Artikel „Rassen und Rassenbildung" behandelt (auch die anderen physiologischen Fragen bezüglich Mischlinge, Mischlingsfruchtbarkeit usw. sind dort nachzusehen).

2. Spezielle Physiologie. 2a) Physiologie des Stoffwechsels. Schon die anatomischen Verschiedenheiten der Darmlänge, des Gewichtes mancher Bauchorgane u. a. zeigen es deutlich an, daß physiologische Unterschiede bestehen müssen. Aber was wir darüber wissen, spricht mehr für direkte Einflüsse stark differenter Klimaverhältnisse. — Es gibt eine kleine Anzahl Einzelarbeiten, z. B. Eijkmann (1895), Kohlbrugge (1910) u. a. Aber gerade sie zeigen, wie schwer es ist, da wirklich eigentliche Rassenunterschiede zu finden. So behauptet z. B. Kohlbrugge, daß geistige Arbeit in den Tropen immer das Zentralnervensystem schädige, auch studierte farbige Eingeborene seien dadurch in derselben Weise betroffen. — Daß gewisse Unterschiede im Stoffwechsel bestehen, deutet der sogenannte „Völkergeruch" an. Andree (1889) hat darüber eine schöne Studie vorgelegt. Adachi (1903) bringt es mit der Vergrößerung der Achselschweißdrüsen des Europäers in Zusammenhang, daß angeblich für die japanische Nase der Europäer „rieche".

Am wichtigsten ist vielleicht — und wird es durch künftige Forschung ganz gewiß noch mehr werden — die Differenz im Serumaufbau der einzelnen Rassen. Einstweilen sind hier die Beziehungen zwischen Menschen- und Affenserum, vor allem Anthropoidenserum wichtig, weil sie von ausschlaggebender Bedeutung für die Frage nach der Blutsverwandtschaft beider Gruppen sind (vgl. den Artikel „Anthropogenese", Bd. I, S. 475). So will Bruck (1907) Holländerblut mit der Serumreaktion von Chinesen- und Malayenblut unterscheiden, Mühsam (1908) dagegen zwischen Deutschen und einem Togoneger keinen Unterschied gefunden haben. — Es müssen da Rassenunterschiede sein, die mit verfeinerten Methoden festzustellen sind, denn v. Dungern (1910) zeigt, daß sogar in den Familienstämmen vererbbare Serumdifferenzen sich sicher nachweisen lassen.

Ueber Respirationskoeffizienten, Puls usw. finden sich bei Topinard einige Angaben — diese Einzelheiten können hier übergangen werden.

2b) Physiologie des Bewegungsapparates. Ueber spezielle Muskelphysiologie existiert bezüglich menschlicher Rassen gar keine Angabe. Allgemeine Beobachtungen über Muskelleistungen (Marschleistungen usw.) sind zahllos in Reiseberichten zerstreut — wenig brauchbares. Daß „Wilde", vor allem Neger, dann nordafrikanische Wüstennomaden im Ertragen von körperlichen Anstrengungen, Märschen (dann auch von Hunger, Durst, Hitze) dem Europäer weit überlegen seien, ist falsch. Die Marsch-, Zug- und Hungerleistungen die einzelne Nord- und Südpolarforscher, oder die Anstrengungen, die manche Afrikaforscher und viele aus der deutschen Schutztruppe im Hereroaufstand aufzuweisen haben, sind den stärksten Eingeborenenleistungen gleich oder überlegen. Nur nichteingewöhnte Europäer können natürlich in Afrika gegen Afrikaner nicht konkurrieren.

Ueber kurzdauernde Muskelkraftleistungen sind auch eigens anthropologische Beobachtungen angestellt worden: Prüfungen der Handdruckkraft mit dem Dynamometer (nach Mathieu). Die Messungen sind nicht ganz leicht genau zu bekommen, da Uebung, Geschicklichkeit, Verstehen oder Nichtverstehen der Aufgabe zum Resultat viel beitragen. Der Weiße ist allen Farbigen überlegen. So beträgt z. B (nach Topinard) die Druckkraft für beide Hände in Kilogrammen bei Franzosen 61, bei Hawai-Insulanern 60,1, bei Mikronesiern 56,8, bei Timoresen 52,4, bei Tasmaniern 50,6, bei Australiern 48,0, bei Chinesen 46,8. — Auch Neger, die in dieser Liste fehlen, sind nach Goulds umfangreichen Untersuchungen dem Weißen stark unterlegen.

Die Bewegungslehre ist wieder ohne systematische Untersuchung geblieben. Unterschiede, die bisher gemeldet sind, sind wohl alle als gewohnheits-, nicht rassenmäßige zu bezeichnen. Dauernde Gewohnheitsbewegungen modeln dann allerdings häufig die anatomische Grundlage (Gelenke vor allem) derart, daß die Bewegungsmöglichkeiten davon abhängig werden. So ist dem erwachsenen Europäer das „Hocken", wie es das europäische Kind und wie es fast alle Menschen primitiver Kultur ausführen — und zwar stundenlang, als Ruhestellung —, nur ausnahmsweise möglich. Dieses Hocken besteht nicht in Kniebeuge mit gleichzeitiger Fersenhebung, sondern in stärkster Kniebeugung bei vollständiger Bodenlage der ganzen Sohle. Dabei muß dann auch das Fußgelenk (oberes Sprunggelenk) sehr stark gebeugt werden. Das ist nur dadurch möglich, daß die Gelenkbänder und -kapseln entsprechend gedehnt sind und die Gelenkflächen sich entsprechend etwas anpassen: am Knie kommt

die „Retroflexion“ der Tibia (s. die Artikel „Schädellehre“ und „Skelett“), die Rückwärtsbiegung des Gelenkendes zustande, am unteren Ende des Schienbeins findet man als Folge (und Voraussetzung) des Hockens eine eigene kleine Gelenkfacette für das Sprungbein; auch die Form des ganzen Knochens wird beeinflußt, er wird in querer Richtung platt, in sagittaler verbreitert, entsprechend der mechanischen Beanspruchung in dieser Richtung („Platyknemie“). — Daß die Nichtbenützung der Zehenbewegung des stiefeltragenden Kulturmenschen diese „verlernen“ oder vielmehr nie richtig „erlernen“ läßt, dürfte bekannt sein; die Greiffähigkeit und Greifgeschicklichkeit der Zehen, besonders der Großzehe gegen die zweite bei sehr vielen menschlichen Gruppen ist nicht Rassemerkmal, sondern nur durch Uebung bedingt.

Ueber Gangunterschiede, die wohl auch nur habituell, aber vorhanden sind, ist nichts Genaues bekannt, der „wiegende“ Gang, das Gehen „aus der Hüfte heraus“ wird gelegentlich erwähnt.

Rechtshändigkeit ist bei der überwiegenden Mehrzahl aller Menschen die Regel; es sind 1 bis 4,5% Linkser (nach den verschiedenen Statistiken); Rassenunterschiede scheinen nicht zu bestehen, nur Sarasins geben in ihrem Celebeswerk an, daß die Mehrzahl der Bewohner von Gorontolo auf Celebes mit der linken Hand arbeiten. Genauere Statistiken von anderen Stämmen der verschiedensten Rassen fehlen völlig. Auf häufigere Linkshändigkeit prähistorischer Rassen hat man aus dem so oft rechtsgedrehten Profil ihrer Tier- und Menschendarstellungen schließen wollen, Sicherheit besteht nicht darüber. Ueber die stammesgeschichtliche Entstehung der Rechtshändigkeit ist noch keine Sicherheit erreicht. Ob Affen funktionell die Rechte bevorzugen, ist strittig. Mollison (1910) hat genaue Messungen am Armskelett der beiden Körperhälften vorgenommen, danach ist die obere rechte Extremität bevorzugt bei Gibbon, Orang und Mensch, die linke bei Schimpanse und Gorilla. Aber Gaupp (1909), der alles Wissenswerte über Rechtshändigkeit gut zusammenstellt und kritisch erörtert, meint, ein Schluß daraus auf die Funktion sei noch nicht bindend. — Ueber Stimme und Sprache (anthropologisch) existiert nichts, was hier zu erwähnen wäre.

2c) Physiologie des Nervensystems und der Sinne. Aus diesem ganzen Gebiet liegen ziemlich viele Arbeiten vor.

So hat Grijns (1902) gefunden, daß die Reaktionsgeschwindigkeit beim Malayen (Java) größer ist als beim Europäer (wenn dieser lange in den Tropen ist, wird sie noch geringer). Derselbe hat festgestellt, daß die Riechschärfe (für Essigsäure, Phenol und Ammoniak) bei Javanen etwa doppelt so groß ist als bei Europäern. Am besten untersucht ist der Gesichtssinn. Gelegentlich werden die Proben von Sehkraft mancher sogenannter Wilden, von Wahrnehmungen auf sehr große Entfernungen, als für Europäer ganz unerreichbar hingestellt. Das ist nicht richtig. Europäische Individuen, die allerdings über individuell vorzügliche Sehkraft verfügen müssen, können jene Sehleistungen der Eingeborenen ebenfalls aufweisen, aber erst nachdem sie durch sehr lange Uebung an die Verhältnisse des betreffenden Landes (Luftdurchsichtigkeit usw.) sich gewöhnt haben (so z. B. in Deutsch-Südwestafrika beobachtet; und umgekehrt kommen bei Eingeborenen auch sehschwächere vor). Allerdings ist solches Sehvermögen weit über dem, was man bei uns meist als normal bezeichnet. Fritsch (1908) hat aber gezeigt, daß das Doppelte der sogenannten Normalsehkraft 1 eigentlich normal ist: er fand die größte Sehschärfe bei Javanen, dann kommen Chinesen, dann Australier, dann Neger, dann Europäer und wahrscheinlich Japaner — da wird sich aber bei beiden Rassenanlage und individuelle Schädigung kaum unterscheiden lassen! Zuletzt kämen die Bainings von Neuguinea. — Andere Autoren sind allerdings etwas abweichender Meinung, es bedarf da noch mancher Untersuchung (vgl. Fritsch). — Ein (verhältnismäßig) sehr beliebtes Forschungsgebiet ist der Farbensinn der „Wilden“. Die jüngste und wohl exakteste Methode gibt Mollison (1911). Meist hat man nur die Zahl oder das Vorkommen und die Art der Farbenblindheit festgestellt; Mollison gibt eine Methode an, das Farbenempfinden sozusagen quantitativ zu bestimmen. Er benützt Kartonstreifen, die mit Zelluloidlösung als Bindemittel mit Erdfarben rot, gelb, grün, blau gefärbt sind, je in 20 Sättigungsnuancen. — Es liegen erst wenige Untersuchungen vor. Bei untersuchten Somalimännern sind gegen Europäer Rot- und Grünempfindung vermindert. — Rivers hat (mit der einfachen früheren Methode) gefunden, daß die Eingeborenen von Torresstraits eine erhöhte Rotempfindlichkeit und dafür eine herabgesetzte Blauempfindlichkeit haben — Rassenunterschiede bestehen also sicher.

2d) Physiologie der Fortpflanzung. Da hier Angaben auf Grund rein statistischer Beobachtungen oder auch nur von Auskünften möglich sind, fließen die Quellen ziemlich reichlich; aber es ist viel zu sichten! — Alle diese Verhältnisse sind ganz ausführlich dargestellt in Bartels-Ploß, Das Weib.

Die Geschlechtsreife tritt beim Weibe (über den Mann liegen keine Detailangaben vor) sicher nach örtlichen und anderen Verhältnissen sehr verschiedenzeitig ein. Es ist

bekannt, daß Mädchen in der Stadt bei uns um mehrere Jahre früher geschlechtsreif werden als auf dem Land. Aber Rassenunterschiede sind das nicht, vielmehr spielen hier Umwelteinflüsse die Hauptrolle. Es liegen eine Anzahl sehr deutlicher Hinweise dafür vor, daß auch das Klima deutlichen Einfluß hat; Europäerinnen scheinen in den Tropen früher zu menstruieren, in Nordeuropa später als in Südeuropa. Manche Autoren leugnen Rassenunterschiede ganz und nehmen nur klimatische an. Aber es scheint doch, daß Jüdinnen unter denselben äußeren Verhältnissen wie die nichtjüdische Bevölkerung früher reif werden als jene, ebenso Negerinnen in den vereinigten Staaten (s. Bartels-Ploß). — Die fast allgemeine Annahme von der ganz besonders frühen Geschlechtsreife der Neger, aller Südseeinsulaner usw. bedarf wohl der Revision; man ist dort stets nur auf Schätzung des Alters angewiesen und hat wohl allgemein falsch geschätzt oder sich auf ganz unzuverlässige Angaben verlassen. Die erste genaue Erhebung, wo das Alter von Missionaren sicher notiert war, legt Reche (1910) vor und findet überraschenderweise, daß bei Mädchen von Matupi (Neupommern) die erste Menstruation durchschnittlich ins 17. Jahr fällt; bei Japanern, wo wir Bälz (l. c.) zuverlässige Angaben verdanken, tritt sie durchschnittlich mit 14,5 Jahren auf, in Zentraleuropa etwa mit 14 bis 16 Jahren. Kurze Zeit vorher tritt jeweils die Körperbehaarung auf (Bartels-Ploß) (über Brustentwickelung und Körperwachstum vgl. den Artikel „Körperform des Menschen"). Ueber Verschiedenheiten der Menstruation scheinen keine Rassenbefunde vorzuliegen.

Ueber den Begattungsmodus ist sehr wenig wirklich Zuverlässiges zu sagen. Friedenthal (1910) und Klotz (1908) bringen Angaben bezüglich mancher phylogenetischer Fragen, Friedenthal macht es wahrscheinlich, daß innerhalb der Anthropoiden die Begattungsarten (Brust gegen Brust oder aber Brust gegen Rücken, also von hinten, wie bei den meisten Säugetieren, auch allen niederen Affen) wechseln und beides vorkommt. Unter den Menschen scheinen nach Bau des Beckens und Lage der Vagina viele Individuen, vielleicht ganze Gruppen, vor allem negritische, eher geeignet zur Begattung von hinten, aber positives Wissen über diese Dinge fehlt uns. Die Frage nach einer natürlichen Periodizität der *Empfängnis*, die dann ein Rest einer „*Brunstperiode*" des Menschen wäre, ist viel erörtert. Sie läßt sich wohl in Europa nicht lösen, weil die Einflüsse sozialer Faktoren (Feste, Gelderlös zu bestimmten Zeiten, Ernte usw.) zu zahlreich sind; im Frühling ist ein deutliches Maximum von Konzeptionen (wahrscheinlich physisch und sozial bedingt), im Spätsommer und Frühherbst ein Minimum. Ueber die natürliche Fruchtbarkeit des Menschen ist sehr schwer etwas zu sagen, da sie durch absichtliche Maßnahmen (Vorbeugemittel, Abortus) und durch allerlei Wirkungen der betreffenden Kulturen (Ernährung, Verbreitung von Geschlechtskrankheiten usw.) außerordentlich stark beeinflußt wird. So ergeben sich sehr starke Schwankungen. Die Kinderarmut Frankreichs ist bekannt, aber in allen europäischen Kulturstaaten geht die Geburtenziffer stark zurück. Aber es gibt auch solche Verhältnisse bei „Wilden", so auf einzelnen Inseln des Bismarckarchipels und vielerorts sonst. Aber all das sind keine Rassenmerkmale, sondern sozial und psychisch bedingte Erscheinungen. Der natürlichen Fruchtbarkeit „des" Menschen dürften durchschnittlich 8 bis 9 Kinder pro Frau entsprechen.

Die „Ueberfruchtung", d. h. das Schwangergehen mit 2 oder mehr Früchten zu gleicher Zeit kommt bei allen Rassen vor, aber entschieden recht ungleich häufig. Da die Neigung dazu offenbar erblich ist — Weinberg (1909) hat sogar ihren Vererbungsmodus nach Mendel nachgewiesen — und da Mehrlingskinder viel weniger Chancen zum Ueberleben haben, darf man vielleicht die Seltenheit von Mehrlingsgeburten bei vielen primitiven Stämmen (Buschmänner, Orang Belendas in Malakka usw.) als Folge einer Auslese ansehen. In Europa sind Zwillingsgeburten in Deutschland auf 1000 Geburten 12,5 mal, in Oesterreich 11,9, in Italien 10,4 mal. Auch sonst — auch in kleineren Gebieten — sind geographisch ziemliche Schwankungen festzustellen. Neger scheinen stärker als Europäer zu Mehrfachgeburten zu neigen. Seltener als Zwillingsfrüchte sind Drillinge und Mehrlinge. Bartels-Ploß gibt die Photographie von Sechslingen einer Negerin der Goldküste wieder, über Siebenlinge liegen glaubwürdige Berichte vor (Bartels-Ploß). Das Geschlechtsverhältnis, d. h. die Zahl, welche angibt, wieviel weibliche Individuen auf 1000 männliche kommen, ist nach der neuesten kritischen Zusammenstellung von Bälz (1911) sehr wechselnd; es ist in Westeuropa 1040 bis 1070, in Ostasien 800 bis 900. Häufig spielen soziale und andere Faktoren mit, man muß mit der Annahme von Rassenunterschieden zurückhalten.

Ueber die „Geburt" ist anthropologisch kaum etwas auszusagen. Es ist bekannt, daß die meisten „Wilden" sehr leicht gebären, immerhin sind Vorkommnisse, daß eine Frau unterwegs gebärt und dann mit dem Säugling auf dem Rücken weiter geht, auch dort seltenste Ausnahmen — und sie kommen auch bei uns vor. — Da auch bei

uns vielerorts oder in bestimmten sozialen Schichten die Geburt fast immer leicht und normal verläuft, dürfen wir wohl die große Häufigkeit von schweren Geburten in den Kulturzentren auf mangelnde Auslese und nicht normalen Körperzustand (Muskelschwäche usw.) der Frauen zurückführen — die Rasse als solche spielt kaum eine Rolle. Ob rassenmäßig die einzelnen Kindslagen verschieden häufig sind, ist unbekannt. Die Stellung der Frau beim Gebären ist ethnisch, nicht anthropologisch bedingt. Das Stillen scheint normalerweise ebenfalls überall gleich, aber durch allerlei Maßnahmen wird die Stillfähigkeit einerseits sehr verlängert (Säugen von mehrjährigen Kindern, auch Tieren) oder aber eingeschränkt (Kleidung, Nichtstillenwollen u. a.; — daß der Alkohol Stillunfähigkeit erzeugen kann, wie behauptet wird [Bunge], scheint unrichtig [Bluhm] —).

Endlich das Klimakterium, also das Aufhören der Periode, tritt bei uns mit 45 bis 49 Jahren ein, in Italien vielleicht durchschnittlich 2 Jahre früher, wirklich genaue Angaben fehlen. Ebenso über die Zeichen der Seneszenz bei Mann und Weib. Auch über die den menschlichen Rassen eigene normale Lebensdauer wissen wir nichts. Ueber die Lebensdauer des Menschen gegenüber der einiger Tiere, die Lebensenergie u. dgl. handelt Rubner (1908).

Literatur. **Andree**, *Völkergeruch. Ethnographische Parallelen. Leipzig.* — **Adacht**, *Geruch der Europäer. Globus 1903.* — **Baelz**, *Das Verhältnis der Geschlechter in den verschiedenen Ländern. Anthr. Korrespbl., 1911.* — **Bartels-Ploss**, *Das Weib usw. Leipzig 1908.* — **Bruck**, *Die biologische Differenzierung von ... menschlichen Rassen durch spezifische Blutreaktion. Zeitschr. Ethnol., 1907.* — **v. Dungern**, *Nachweis und Vererbung biochemischer Strukturen. Münch. med. Wochenschr., 1910 und Zeitschr. Immunitätsforsch., 1910.* — **Eijkmann**, *Vergleichende Untersuchungen über physiologische Wärmeregulierung bei den europäischen und malayischen Tropenbewohnern. Virch. Archiv, 1895.* — **Friedenthal**, *Beiträge zur Naturgeschichte des Menschen, V. Jena 1910.* — **Fritsch**, *Bau und Bedeutung der Area centralis. Berlin 1908.* — **Gaupp**, *Ueber die Rechtshändigkeit des Menschen. Jena 1909.* — **Grijns**, *Bestimmung der Reaktionszeit bei Europäern und Malayen. Arch. f. Anat. u. Phys. (Phys. Abt.), 1902* — **Derselbe**, *Messungen der Riechschärfe usw., ebenda, 1906.* — **Klotz**, *Der Mensch ein Vierfüßler. Leipzig 1908.* — **Kohlbrugge**, *Der Einfluß des Tropenklimas auf den blonden Europäer. Arch. Rass. Ges. Biol., 1910.* — **Mollison**, *Die Körperproportionen der Primaten. Morph. Jahrb., 1910.* — **Derselbe**, *Eine neue Methode zur quantitativen Prüfung des Farbensinnes usw. Naturf. Vers. Karlsruhe 1911.* — **Mühsam**, *Die Bedeutung der neuen Methode der Blutdifferenzierung für die Anthropologie. Zeitschr. Ethnol., 1908.* — **Reche**, *Untersuchungen über Wachstum und Geschlechtsreife. Anthr. Korrespbl., 1910.* — **Rubner**, *Das Problem der Lebensdauer usw. Berlin 1908.* — **Topinard**, *Anthropologie (deutsch). Leipzig 1888.* — **Weinberg**, *Anlage zur Mehrlingsgeburt bei Menschen und ihre Vererbung. Arch. Rassen Ges. Biol., 1909.*

E. Fischer.

Rauchwacke

= Zellendolomit = Kastendolomit, bezeichnet ein zerfressenes, löcheriges dolomitisches Gestein (z. B. im Zechstein und Keuper). Gebildet durch Auslaugung (vgl. die Artikel „Permformation" und „Triasformation").

Raum.

A. Geometrische Untersuchungen über den Raum. 1. Metrische und projektive Geometrie. 2. Die Axiome der Geometrie. 3. Axiomatik und Nicht-Euklidische Geometrie. B. Philosophische Untersuchungen über den Raum. 1. Empirismus. 2. Konventionalismus. 3. Kritizismus. 4. Einwendungen gegen den Kritizismus.

A. Geometrische Untersuchungen über den Raum.

Während die Physik eine gewisse Klasse von Naturvorgängen im Raume zu erforschen hat, ist es die Aufgabe der Geometrie, die Gesetzmäßigkeiten im Raume selbst ohne Beziehung auf empirisch gegebene räumliche Gegenstände festzustellen und abzuleiten. Im folgenden soll das Wesen der geometrischen Untersuchungen kurz charakterisiert werden.

1. Metrische und projektive Geometrie. Geometrische Untersuchungen können darauf gerichtet sein, Maßbeziehungen zwischen geometrischen Größen herzuleiten, Winkel, Strecken usw. miteinander zu vergleichen. Man faßt alle solche Untersuchungen, in denen der Maßbegriff eine Rolle spielt, unter dem Namen „metrische Geometrie" zusammen und stellt ihr die „projektive Geometrie" gegenüber; diese ist dadurch gekennzeichnet, daß alle ihre Untersuchungen sich von speziellen Maßbeziehungen freizumachen suchen und lediglich Lagenverhältnisse von Punkten, Geraden, Ebenen usw. zum Gegenstande haben.

Ein Beispiel für die metrische Geometrie ist der pythagoreische Lehrsatz. Ein Beispiel eines Satzes der projektiven Geometrie ist der folgende: Wenn zwei Dreiecke ABC, A′B′C′ im Raume so liegen, daß die drei Geraden AA′, BB′ CC′ sich in einem Punkte S schneiden, so schneiden sich die Geraden AB und A′B′, AC und A′C′, BC und B′C′, und die drei Schnittpunkte liegen wiederum auf einer Geraden.

Die Begriffe und Methoden der projektiven Geometrie sind in neuerer Zeit immer mehr in den Vordergrund getreten. Insbesondere verdankt man der projektiven Geometrie eine wichtige allgemeine geometrische Einsicht, das „Prinzip der Dualität"; dieses Prinzip besagt, daß man aus jedem Satze der projektiven Geometrie einen anderen ableiten kann, indem man die Begriffe Punkt, Gerade, Ebene, Verbindungslinie, Schnittpunkt dreier Ebenen, Schnittgerade durch die Begriffe Gerade, Punkt, Schnittgerade, Ebene durch drei Punkte, Verbindungslinie ersetzt. In der Geometrie der Ebene vereinfacht sich das Prinzip, indem sich die Begriffe Punkt, Gerade, Verbindungsgerade, Schnittpunkt einerseits, Gerade, Punkt, Schnittpunkt, Verbindungsgerade andererseits dual entsprechen. Ausnahmefälle, die dabei durch Auftreten paralleler Linien usw. entstehen, können durch Einführung „ideeller" oder, wie man sie auch nennt, „unendlich ferner" Elemente beseitigt werden.

So ist der bekannte Satz des Ceva der duale zu dem des Menelaus, der des Pascal der duale zu dem des Brianchon.

Mit Hilfe des der projektiven Geometrie zugrunde liegenden Begriffes der projektiven Transformation wird es möglich, durch Heranziehung weiterer mathematischer Hilfsmittel (Invariantentheorie) die metrische und sogar allgemein die nicht-euklidische Geometrie (s. A 3) in einem einheitlichen Aufbau mit der projektiven Geometrie zu vereinigen.

2. Die Axiome der Geometrie. Es ist das Bestreben der Geometrie, ihre Wahrheiten in ein logisch aufgebautes System zu ordnen. Dieser Aufbau geschieht, indem man die geometrischen Sätze durch logische Schlußketten, die Beweise, zurückführt auf gewisse einfache Sätze, die Axiome der Geometrie, die man ihrerseits nicht mehr ableitet, sondern als Grundlage des ganzen Baues ansieht und die unmittelbar einleuchtend sind.

In zahlreichen modernen Untersuchungen ist der Grundsatz der axiomatischen Erforschung des Raumes in der Geometrie, der schon Euklids Elementen ein charakteristisches Gepräge verleiht, zu seiner vollen Bedeutung gelangt. Man kann die Geometrie in sehr verschiedener Weise axiomatisch aufbauen, je nachdem man verschiedene Axiomensysteme zugrunde legt. Vor allem hat man zwei Richtungen zu unterscheiden. Die eine auf Euklid zurückgehende, stellt gewisse Axiome der Verknüpfung, Anordnung, Kongruenz und das Parallelenaxiom voran, während der Stetigkeitsbegriff und die damit zusammenhängenden Axiome möglichst zurücktreten.

Die andere, in ihrem Ursprung modernere Richtung geht von dem Begriffe der Stetigkeit der Bewegung und der Gruppe aus.

Axiome der Verknüpfung sind z. B.: Zwei verschiedene Punkte bestimmen eine Gerade; zwei nichtparallele Geraden der Ebene bestimmen einen Punkt; ein Axiom der Anordnung: Wenn A und C Punkte einer Geraden sind, so gibt es Punkte B, die zwischen A und C liegen. Das Parallelenaxiom in der Ebene besagt: Durch jeden außerhalb einer Geraden a gelegenen Punkt gibt es eine und nur eine die Gerade a nicht schneidende Gerade.

Auf der Tatsache, daß von jedem der Axiome der Verknüpfung und Anordnung auch das duale gilt, beruht das Dualitätsprinzip.

3. Axiomatik und nicht-euklidische Geometrie. Ein System von Axiomen muß folgenden Anforderungen genügen: a) Die Axiome müssen widerspruchsfrei sein, d. h. sie dürfen nicht durch logische Folgerungen zu widersprechenden Ergebnissen führen. b) Die Axiome müssen voneinander unabhängig sein, d. h. es darf in keinem etwas enthalten sein, was aus den übrigen sich logisch folgern läßt. Diese beiden Forderungen der Widerspruchslosigkeit und Unabhängigkeit haben zu den modernen axiomatischen Untersuchungen Anlaß gegeben, deren Ergebnis eine klare Erkenntnis von der logischen Stellung der einzelnen geometrischen Tatsachen zueinander ist, und die aufs engste mit der Entwickelung der nicht-euklidischen Geometrie zusammenhängen. Den Beweis für die Widerspruchslosigkeit der Axiome führt man, indem man zeigt, daß jeder Widerspruch in den Axiomen einen Widerspruch in den Grundgesetzen der Arithmetik zur Folge haben müßte. Die Widerspruchslosigkeit der Grundgesetze der Arithmetik wird dabei als gesichert angenommen. — Den Beweis für die Unabhängigkeit eines Axioms A von den anderen A'... führt man, indem man zeigt, daß die Annahme des Gegenteiles von A logisch mit der Gültigkeit aller übrigen Axiome A'... verträglich ist. Es kommt also darauf an, ein System S von Dingen zu konstruieren, in denen alle durch die Axiome A'... ausgedrückten Beziehungen bestehen, dagegen die durch A ausgedrückte Relation nicht gilt. Zu diesem Zwecke abstrahiert man von der natürlichen Bedeutung der Worte „Punkt", „Gerade", „Ebene" usw. und konstruiert sich irgendein System von Dingen, die man „Gerade," „Punkte", „Ebenen" usw. nennt, definiert zwischen ihnen Beziehungen, die man als „Verbinden", „Schneiden" usw. bezeichnet, und trifft alle diese Definitionen so, daß dieses System S den Axiomen A'... genügt, und dem Axiom A nicht genügt. Kann man zeigen, daß ein logisch widerspruchsfreies derartiges

System S existiert, so ist damit die logische Unabhängigkeit des Axioms A von den übrigen dargetan.

Das ist der Grundgedanke, auf dem die nicht-euklidische Geometrie beruht. Diese entspringt aus dem Problem, die Unabhängigkeit des Parallelenaxioms von den übrigen Axiomen zu beweisen.

Eine solche nicht-euklidische Geometrie konstruiert man am einfachsten folgendermaßen: Man definiere als Gerade, Ebenen, ... die wirklichen Geraden, Ebenen usw., soweit sie innerhalb einer gegebenen Kugel verlaufen; schneiden, verbinden usw. soll dasselbe heißen wie in der Euklidischen Geometrie. Wenn man nun den Begriff der Kongruenz in geeigneter Weise definiert und parallel zwei Gerade nennt, die sich auf der Kugeloberfläche schneiden, so genügt unser System allen Axiomen außer dem Parallelenaxiom; es gibt jetzt durch jeden Punkt zwei Parallele zu einer Geraden.

Die nicht-euklidische Geometrie ist nur ein spezielles Beispiel für eine Geometrie, in der alle Axiome der euklidischen Geometrie bis auf eines erfüllt sind.

B. Philosophische Untersuchungen über den Raum.

Die Geometrie lehrt uns zwar die geometrischen Eigenschaften des Raumes auf gewisse Axiome zurückzuführen, aber über die Erkenntnisquellen, aus denen die Axiome stammen, sagt sie nichts aus, und es wird daher eine weitere philosophische Untersuchung über die Erkenntnisquellen der geometrischen Sätze nötig. Die philosophischen Ansichten und Theorien, die über diese Frage in der Literatur vorliegen, tragen zum Teil einen mehr oder weniger dilettantischen Charakter, indem sie entweder den mathematisch-physikalischen oder den philosophischen Schwierigkeiten der Sache nicht gerecht werden; es ist daher noch keine philosophische Theorie zur allgemeinen Anerkennung durchgedrungen. Im folgenden soll über die wichtigsten Typen dieser philosophischen Theorien ein Ueberblick gegeben werden.

Da, wie man leicht sieht, die Axiome der Geometrie nicht rein logisch ableitbar sind, so ist es nötig, für die Axiome andere Erkenntnisquellen als die formale Logik aufzusuchen.

1. Der Empirismus. Der Empirismus sieht diese Erkenntnisquelle in der Erfahrung. Nach ihm sind die geometrischen Axiome und damit die Eigenschaften des Raumes genau so Erfahrungstatsachen wie irgendein chemisches oder physikalisches Faktum; nur der Grad der Genauigkeit ist bei diesen geometrischen Erfahrungen höher. Auf diesen Standpunkt stellte sich auch Gauß mit seinem Versuche, durch Messung des Dreieckes: Hoher Hagen, Brocken, Inselsberg festzustellen, ob die Winkelsumme in diesem Dreiecke zwei Rechte betrage oder nicht, und damit zu entscheiden, ob die euklidische oder eine nicht-euklidische Geometrie richtig ist. Zur Begründung der empiristischen Theorie führt man eine Reihe psychologischer und physiologischer Ergebnisse an, die uns verfolgen lassen, wie in dem Individuum die Raumvorstellung und die geometrische Einsicht sich entwickelt, von welchen physiologischen Bedingungen sie abhängig ist, usw. Bei näherer Prüfung zeigt sich jedoch, daß diese empiristischen Theorien zwar interessante psychologische und physiologische Aufschlüsse über die Entwickelung der Raumanschauung liefern, aber über das erkenntniskritische Problem gar nichts aussagen. Sie alle operieren von vornherein mit der geometrischen Raumvorstellung, und jeder Versuch, auf diese Weise die geometrische Raumvorstellung zu erklären, ist eine petitio principii.

2. Konventionalismus. In der Einsicht, daß weder Logik noch Erfahrung den Erkenntnisgrund für die geometrischen Wahrheiten abgeben kann, ist eine weitere philosophische Richtung zu dem Standpunkt gelangt, daß die Axiome überhaupt keine Erkenntnisse sind, sondern lediglich Konventionen, die nur den Zweck haben, in möglichst einfacher und bequemer Weise die Grundlage zu einem weiteren logischen Aufbau einer für die Anwendung zweckmäßigen Geometrie zu liefern. Der euklidischen Geometrie ist hiernach vor der nicht-euklidischen Geometrie darum der Vorzug zu geben, weil sie bei der Beschreibung der Naturvorgänge einfachere und bequemere Formeln liefert, nicht weil sie wahr ist. Auch diese konventionalistische Theorie, die im letzten Grunde darauf hinausläuft, Wahrheit und Zweckmäßigkeit einander gleichzusetzen, enthält, wie die nähere Prüfung ergibt, eine petitio principii.

3. Kritizismus. Wesentlich tiefer wird das Problem von der kritischen Philosophie angefaßt. Diese lehrt, daß es außer der formalen Logik und der Erfahrung noch andere Erkenntnisquellen gibt. Die nicht empirische und nicht logische Quelle der geometrischen Erkenntnis heißt die reine Anschauung; der geometrische Raum ist der Gegenstand der reinen Anschauung, und jede empirische Anschauung ist erst durch diese reine Anschauung möglich. Die Objekte der Geometrie sind Konstruktionen in der reinen Anschauung; durch die Aufweisung der reinen Anschauung müssen also die Axiome der Geometrie und damit die Geometrie begründet werden.

Um sich die Existenz der reinen An-

schauung klar zu machen, hat man von einem gegebenen räumlichen Objekt, z. B. einem physischen Würfel, alles zu abstrahieren, was daran physikalische oder andere empirische Bestimmungen sind, d. h. Farbe, Festigkeit, Temperatur usw. Es bleibt die geometrische Gestalt übrig, die von allen empirischen Bestimmungen des materiellen Körpers unabhängig ist, vielmehr erst das Substrat gibt, an das sich diese empirischen Bestimmungen anheften können. Die Aufweisung der reinen Anschauung geschieht somit durch einen Prozeß der Abstraktion im Gegensatz zu dem den empiristischen Theorien zugrunde liegenden Prozesse der Induktion.

Mit der Lehre von der reinen Anschauung ist nicht nur die Geometrie als eine nicht rein logische Wissenschaft a priori verständlich gemacht, sondern zugleich auch erklärt, weshalb wir die Geometrie auf Naturobjekte anwenden können; denn die Naturgegenstände als Gegenstände empirischer Anschauung müssen den Bedingungen der empirischen Anschauung, d. h. den Gesetzen der reinen Anschauung genügen.

4. **Einwendungen gegen den Kritizismus.** Die Lehre von der reinen Anschauung tritt bei ihrem Begründer Kant und in der an Kant anschließenden Literatur in einer dem modernen wissenschaftlichen Denken fremdartigen Form auf und ist überdies mit verschiedenen unhaltbaren Folgerungen vermengt. Hierin liegt zum Teil der Grund für die Ablehnung, welche die Kantschen Ideen vielfach in den Kreisen der exakten Wissenschaft erfahren. Von den Einwänden, die gegen die oben skizzierte Lehre erhoben werden, sollen noch kurz zwei besprochen werden: Einmal weist man darauf hin, daß unsere Anschauung nicht mathematisch genau sei, daß sie sogar oft in der Mathematik zu falschen Schlüssen führe; daher könne man die Anschauung nicht als letzte Quelle der geometrischen Wahrheiten ansehen. Diesem Einwand begegnet man leicht durch den Hinweis, daß die genannten Mängel zwar der empirischen Anschauung anhaften, aber nicht der reinen Anschauung, die die Norm abgibt, nach der alle empirischen Anschauungen idealisiert werden müssen. Ein zweiter Einwand stützt sich auf die Existenz der nicht-euklidischen Geometrie und auf die Möglichkeit, eine solche Geometrie anschaulich darzustellen und in ihr auf einfache Weise anschaulich zu operieren, ja, sogar ihre Vorstellungen auf die Physik anzuwenden. Demgegenüber ist hervorzuheben, daß alle diese anschaulichen Konstruktionen der nicht-euklidischen Geometrie in Wahrheit Konstruktionen in der euklidischen Anschauung sind, und daß man die abweichenden Gesetze nur dadurch erhält, daß man Worte, wie Gerade, Bewegung usw. auf Grund ausdrücklich getroffener Vereinbarung in anderem Sinne verwendet, als im Sinne des ursprünglichen Sprachgebrauches der euklidischen Geometrie.

Hiernach wird man der Lehre von der reinen Anschauung vor den anderen philosophischen Theorien über den Raum den Vorzug geben müssen.

Literatur. *Zu A:* **Reye,** *Die Geometrie der Lage. Leipzig 1909.* — **F. Enriques,** *Vorlesungen über projektive Geometrie. Leipzig 1903.* — **F. Klein,** *Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschung. Mathem. Annalen Bd. 43.* — **D. Hilbert,** *Grundlagen der Geometrie. Leipzig 1909.*

Zu B: **J. St. Mill,** *System der deduktiven und induktiven Logik, deutsch von Schiel. Braunschweig 1877.* — **H. Helmholtz,** *Ueber den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen Axiome. Die Tatsachen der Wahrnehmung. Vorträge und Reden, Bd. 2. Braunschweig 1896.* — **H. Poincaré,** *La science et l'hypothèse.* — **Derselbe,** *La valeur de la science. Paris.* — **Kant,** *Kritik der reinen Vernunft.* — **Derselbe,** *Prolegomene zu jeder künftigen Metaphysik.* — **E. F. Fries,** *Die mathematische Naturphilosophie. Heidelberg 1822.* — **L. Nelson,** *Kant und die nichteuklidische Geometrie. Berlin 1906.* — *Ferner die Arbeiten von* **Nelson und Hessenberg** *in den „Abhandlungen der Friesschen Schule", neue Folge, Bd. 1 u. 2, Göttingen.*

R. Courant.

Raumgitter.

1. **Der Begriff des Raumgitters. Symmetrie der Raumgitter. Zahl der möglichen Raumgitter und Punktsysteme.** Der Begriff „Raumgitter" dient dazu, die gegenseitige Lage der kleinsten materiellen Teilchen, aus denen ein Kristall besteht, anschaulich zu machen. Bravais, der als einer der ersten und in besonders eleganter Form die Raumgittertheorie bearbeitete, nahm an, daß für jeden Kristall diese kleinsten materiellen Teilchen — die „Formelemente" — die gleiche Symmetrie besitzen wie der Kristall selbst und gitterförmig im Raume sowie netzförmig in den Umgrenzungsebenen des Kristalls angeordnet sind.

In der Ebene kann man folgende Arten von Netzen unterscheiden: 1. das allgemeinste parallelogrammatische Netz, 2. das aus Rechtecken bestehende Netz, 3. das aus Rhomben sich aufbauende Netz, 4. das aus gleichseitigen Dreiecken und 5. das aus Quadraten sich zusammensetzende Netz. Von diesen Polygonen hat man kongruente Exemplare so aneinanderzulegen, daß sie die Ebene lückenlos ausfüllen und hat in die Ecken dieser Polygone die Formelemente eingesetzt anzunehmen.

Wenn man in parallelen und gleichweit voneinander abstehenden Ebenen solche Netze (und zwar kongruente Exemplare) ausbreitet, so gelangt man zu den Raumgittern. Z. B. liefern die aus quadratischen Maschen bestehenden Netze das Raumgitter der Würfel, wenn man den Abstand der Netzebenen als ebenso groß wie die Breite der Maschen annimmt; es steht alsdann über jeder einzelnen Masche des Netzes ein Würfel.

Wird der Abstand zwischen den Netzebenen größer als die Breite der Maschen angenommen, so entsteht ein verlängerter Würfel, wie er für das tetragonale System (vgl. den Artikel „Kristallformen") charakteristisch ist, über jeder Masche. In dieser Weise kann man sich die Grundformen aller Kristallsysteme durch Raumgitter veranschaulichen und zwar entsprechen den meisten Kristallsystemen mehrere Raumgittertypen, da es 14 Arten von Raumgittern, aber nur 6 Kristallsysteme gibt.

Da es sich in der Kristallographie meistens um Fragen der Symmetrie handelt, so kommt es auch bei den Raumgittern weniger auf die genaue Gestalt an, als auf ihre Symmetrieeigenschaften. Die wahre Gestalt der Raumgitter ist bisher für keinen Kristall ermittelt, da die Kenntnisse über den Molekularzustand der Materie zurzeit hierfür noch gar nicht ausreichen.

Aber auch schon die Symmetrie der Raumgitter hängt von der Beschaffenheit der Moleküle ab. Stellt man sich die Ecken der Gitter als materielle Punkte vor, so erhält man sogenannte „Punktgitter", deren Symmetrie höher sein kann als diejenige der „Molekelgitter", die man dadurch erhält, daß man niedrig symmetrische Formelemente in den Gitterecken anbringt.

Außerdem existiert die Möglichkeit, die Formelemente in den Gitterecken nicht durchweg in paralleler Stellung anzubringen, sondern in sogenannter „alternierender" Lage, d. h. so, daß z. B. das erste, dritte fünfte usw. unter sich parallel sind, ebenso das zweite, vierte, sechste usw. Formelement, daß aber niemals ein Formelement der ersten Art parallel einem solchen der anderen Art steht.

E. Sommerfeldt hat kürzlich gezeigt, daß durch solche „alternierende Gitter" sich auch die teilflächigen Symmetrien der Kristalle vollständig erklären lassen, während die 14 Gitter Bravais' vorzugsweise den vollflächigen (holoedrischen) Fällen entsprechen und z. B. zur Erklärung des optischen Drehungsvermögens (vgl. den Artikel „Kristalloptik") nicht ausreichen.

Vor der Benutzung der alternierenden Gitter wurde die Struktur der teilflächigen Kristalle durch sogenannte „Punktsysteme" nach Sohncke erklärt, d. h. durch allgemeinere Punktgruppierungen, welche als Ineinanderstellungen von Raumgittern, nicht aber als Raumgitter selbst aufgefaßt werden können. Je nachdem die Teilgitter im rechten oder linken Schraubungssinn aufeinanderfolgen, lassen sich rechte und linke gewendete Kristallstrukturen erzeugen. Es kann das optische Drehungsvermögen der Kristalle also nicht nur durch die Asymmetrie der Moleküle erklärt werden, wie es in der Stereochemie (s. den Artikel „Isomerie") erfolgt, sondern auch durch die asymmetrische Gruppierung der Moleküle im Raume.

Die Theorie Sohnckes, welche auf 65 Typen von Punktsystemen führte, wurde ungefähr gleichzeitig von Fedorow, Schönflies und Barlow erweitert und führte auf 165 weitere Fälle, so daß 65 + 165 = 230 Typen von Kristallstrukturen nach der so erweiterten Theorie möglich sind. Diese neueren Theorien umfassen also auch die 65 Fälle Sohnckes, und zwar deshalb, weil Sohncke nur die Symmetrie in bezug auf Symmetrieachsen (d. h. die direkte Symmetrie) seiner Einteilung in 65 Fälle zugrunde legte, während man bei Mitberücksichtigung der Symmetrieebenen (oder genauer der inversen Symmetrie) zu den 165 weiteren Fällen gelangt.

Die Theorie für die Einteilung der Kristalle ist also sehr genau durchgearbeitet, wie aber in der Natur die Kristalle sich auf diese große Zahl von Fällen verteilen, dafür liefern die bisherigen Forschungen nur sehr wenig Anhalt, da es bisher noch ziemlich unbekannt ist, in welchem Verhältnis die Symmetrie der makroskopisch sichtbaren Kristalle zu der Symmetrie der Formelemente steht, aus welchen sie sich aufbauen.

2. Die Beziehungen der Raumgitter zu den physikalischen Eigenschaften der Kristalle. Die Leistungen der Strukturtheorie erstrecken sich auf viele physikalische Eigenschaften der Kristalle, auch hat E. Sommerfeldt eine Erklärung der anomalen Aetzfiguren durch die Strukturtheorie geliefert, aber es fehlt zurzeit noch die Brücke zu den quantitativen Untersuchungsmethoden der Kristallphysik, meistens sind

die Schlüsse, welche die Strukturtheorie erlaubt, nur qualitativer Art und betreffen oft mehr das Einteilen und Klassifizieren der Kristallsubstanzen, als deren näheres Studium. Auch die Verbindung der Raumgittertheorie mit der modernen physikalischen Atomistik (z. B. der Elektronentheorie) weist noch große Lücken auf und erscheint schwierig.

2a) Kristallformen. Sehr zahlreich sind die Beziehungen der Raumgitter zu dem Studium der Kristallformen: die Eigenschaften der Kristallzwillinge, die geometrischen Eigenschaften isomorpher Kristalle, der pseudosymmetrischen Kristalle[1]) und die entstehenden Grenzflächen im allgemeinen lassen sich mit Hilfe der Raumgittertheorie veranschaulichen. Oft ist es für die Behandlung der geometrischen Eigenschaften der Kristalle nicht einmal nötig, die Raumgitter als Modelle für die innere Struktur der Kristalle zu betrachten; vielmehr führt auch schon der ganz hypothesenfreie und rein empirische Begriff der Achsenelemente (vgl. den Artikel „Kristallformen") zu der Vorstellung des Raumgitters.

Trägt man auf dem Achsenkreuz eines Kristalls von seinem Nullpunkt aus die Achseneinheiten und ihre ganzzahligen Vielfachen ab, so erzeugt man dadurch schon den wesentlichsten Teil eines Raumgitters; denn man braucht nur noch durch die so entstandenen Skalenpunkte Parallelen zu den Kristallachsen zu legen, um das Raumgitter zu vervollständigen. Man kann so das Raumgitter als den geometrischen Ausdruck für das Gesetz der rationalen Achsenabschnitte betrachten.

Es bringt eine derartige Zuhilfenahme der Raumgitter manche Vereinfachungen in den Rechnungen der geometrischen Kristallographie mit sich, z. B. wurden für die Transformation der Achsenelemente im Anschluß hieran von E. Sommerfeldt die allgemeinsten Formeln angegeben.

Der Begriff des Raumgitters steht ferner in interessanten Beziehungen zur Zahlentheorie, die dadurch mit der Kristallographie verknüpft erscheint, was schon der berühmte Mathematiker Gauß bei Besprechung eines Buches von Seeber über ternäre Formen hervorhob.[2])

Diese Beziehungen erstrecken sich besonders auf die Reduktionstheorie der quadratischen Formen; die Frage, wie viele Typen von reduzierten quadratischen Formen es gibt, führt geometrisch gedeutet auf kristallographische Symmetriefragen hinüber. Rein mathematische Eigenschaften der Raumgitter sind ferner von Felix Klein (Autographierte Vorlesungen über Zahlentheorie) und Minkowski (z. B. Geometrie der Zahlen)[1]) untersucht worden; auch Publikationen von Hurwitz und Selling kommen hierfür in Betracht.

2b) Zonengesetz. Gesetz der rationalen Parameter. In der geometrischen Kristallographie läßt sich der Satz, daß die Symmetrieachsen der Kristalle nur 2-, 3-, 4- oder 6zählig sein können, aus der Raumgittertheorie leicht ableiten, ferner auch das Zonengesetz und das mit ihm gleichwertige Rationalitätsgesetz (die sogenannten Gesetze der rationalen Parameter, Indizes und Doppelverhältnisse sind nur verschiedene mathematische Formulierungen der gleichen Tatsachen).

2c) Häufigkeit der Kristallflächen. A. Bravais und E. Mallard bildeten die Theorie weiter aus, nach welcher diejenigen Netzebenen eines Raumgitters am häufigsten als Kristallflächen auftreten, welche am dichtesten mit Materie besetzt erscheinen, während die weniger dichten (also weitmaschigen) Netzebenen entsprechend seltener als Kristallflächen dieser Theorie zufolge auftreten.

2d) Die topischen Achsenelemente. Auch die „topischen Achsenelemente" stehen in engen Beziehungen zu den Raumgittern. Man bezeichnet als die topischen Achsenlängen einer Kristallsubstanz die Längen der Kanten eines Parellelepipeds, dessen Volumen gleich dem Molekularvolumen[2]) der betreffenden Substanz gleich ist und dessen Kanten den kristallographischen Achseneinheiten dieser Substanz parallel und proportional sind. Man kann dieses Parallelepiped zugleich zum Aufbau eines Raumgitters benutzen, welches für jene Kristallsubstanz charakteristisch ist, aber darum doch nicht genau der wahren Struktur der betreffenden Substanz zu entsprechen braucht.

Zum Vergleich der Kristallformen isomorpher oder chemisch analoger Substanzen haben sich die topischen Achsenelemente als sehr nützlich erwiesen und wurden besonders von Tutton bei seinen zahlreichen einschlägigen Untersuchungen benutzt.

2e) Die homogene Deformation. Mit dem Begriff des Raumgitters lassen sich auch die homogenen Deformationen gut verbinden, welche ein Kristall z. B. durch Temperaturänderungen erfährt. In ent-

[1]) Hierunter versteht man Kristalle, die sich einer Symmetrie, die höher ist als diejenige, welche ihnen wirklich zukommt, stark nähern.

[2]) Vgl. auch Seeber, Ann. Phys. Chem. 76 (1824) p. 229, 349.

[1]) Auch H. Minkowski, Nachrichten d. Gött. Ges. d. Wiss. 1904.

[2]) Als Molekularvolumen bezeichnet man das Volumen eines Grammoleküls, also den Quotienten aus Molekulargewicht und spezifischem Gewicht. Wasser hätte folglich das Molekularvolumen 18.

sprechendem Maße wie die Intensität des äußeren Einflusses ändert sich auch die Gestalt des Raumgitters; rein geometrisch gesprochen kann man jedes Raumgitter aus jedem anderen durch homogene Deformation entstanden denken. Hierfür (oder eigentlich nur für die dadurch bedingte Aenderung des Achsenkreuzes) hat bereits Sohncke ein anschauliches Modell konstruiert, welches die Achsenkreuze der verschiedenen Kristallsysteme auseinander ableitet. Die in der Natur beobachteten homogenen Deformationen erstrecken sich zwar meist nur auf geringe Winkeländerungen, sind aber in den Fällen sehr wichtig und leicht feststellbar, in welchen das Raumgitter eine Aenderung der Symmetrie durch die Deformation erfährt. Z. B. geht das Mineral Leucit, das bei gewöhnlicher Temperatur nach einem dem regulären System sich nur nähernden Raumgitter seine Kristalle formt, bei hoher Temperatur in eine vollkommen zum regulären System gehörige Struktur über.

Der Begriff der homogenen Deformation ist auch für die Theorie der dichtesten Kugelpackungen von Wichtigkeit. Wenn man die gitterartig angeordneten Formelemente als Kugeln annimmt, die sich in Punkten berühren, so sind im regulären System die Fälle möglich, welche genau den Typen der gewöhnlichen Raumgitter entsprechen, je nachdem 6, 8 oder 12 Kugeln sich berühren. Durch homogene Deformation kann man die Kugeln in Ellipsoide und zugleich die von ihren Zentren gebildeten Gitter in nichtreguläre Gitter überführen und erhält dadurch für alle 14 Raumgitter der Bravaisschen Theorie Beispiele von dichtesten Packungen. Lord Kelvin hat die Frage untersucht, wann derartige Pakkungen die größte Stabilität aufweisen, er fand, daß bei der Berührung von je 12 Kugeln (rhombendodekaedrischer Fall) die Stabilität am größten, bei der Berührung von 6 Kugeln (kubischer Fall) aber am kleinsten wird. Betrachtet man Kugeln, die nach dreiseitigen Säulen in dichtester Lagerung befindlich sind, und nimmt man die Kantenlängen dieser Säulen als Achseneinheiten eines hexagonalen Achsenkreuzes an, so findet man gerade dieses Achsenverhältnis unter den hexagonalen Substanzen besonders oft wieder (nach J. Pope, Nature 1910, S. 187).

2f) Spaltbarkeit und Gleitflächen. Unter den physikalischen Eigenschaften ist die Spaltbarkeit für die Raumgittertheorie besonders wichtig, durch sie wurde Haüy zu der Vorstellung geführt, daß alle Kristalle aus kleinen Teilchen von der Form ihrer Spaltkörper sich aufbauen. Da aber nicht alle Kristallsubstanzen Spaltbarkeit aufweisen, entwickelte sich hieraus die Annahme, daß längs den am dichtesten besetzten Netzebenen die Kohäsion ein Maximum, senkrecht dazu ein Minimum sein müsse. Doch ist zu beachten, daß nicht nur längs Spaltflächen, sondern auch längs Schiebungsflächen eine Zerlegung der wirklichen Kristalle ausgeführt werden kann. Da z. B. beim Steinsalz durch Zerschlagen mit einer Messerkante längs Würfelflächen, beim Schlagen mit einer Nadelspitze längs Rhombendodekaederflächen der Zerfall beginnt, ist man im Zweifel, welche von beiden Kohäsionsverminderungen den Vorzug verdient.

Aus den Eigenschaften der einfachen Schiebungen nach Gleitflächen hat O. Mügge Schlüsse über die Beschaffenheit der Raumgitter gezogen.

2g) Zwillingsbildung. Für die Zwillingsbildung hat Tschermak eine der Raumgittertheorie sich gut anpassende Theorie entwickelt; diese sowie der schon behandelte Begriff der homogenen Deformation kommen auch für die pseudosymmetrischen Kristallbildungen in Betracht.

2h) Polymorphe Zustandsänderungen. Viele Zustandsänderungen (sogenannte polymorphe Umwandlungen) fester Körper lassen sich ferner durch die Annahme, daß eine Umlagerung der Moleküle zu einem neuen Raumgitter erfolge, erklären.

2i) Kristalline Flüssigkeiten. Auch die merkwürdigen optischen Eigenschaften der kristallinen Flüssigkeiten scheinen sich dadurch zu erklären, daß eine raumgitterartige parallele Orientierung der kleinsten Teilchen dieser Flüssigkeiten längs den Grenzflächen (Objektträger und Deckglas) möglich ist.

2k) Isomorphie. Bei isomorphen Kristallen pflegt man eine Analogie ihrer Raumgitter vorauszusetzen, auch die annähernde Uebereinstimmung des Molekularvolumens isomorpher Substanzen ist in gutem Einklang mit dieser Annahme. Bei den nicht gerade seltenen Doppelsalzen, welche durch eine auffallende Analogie der Kristallformen mit ihren Komponenten verbunden erscheinen (wie z. B. Dolomit mit Kalkspat und Magnesit), kann man ebenfalls annehmen, daß die Vereinigung der Komponenten ohne wesentliche Umlagerung ihrer Raumgitter erfolgt sei; bei der Mehrzahl der Doppelsalze ist aber eine von ihren Komponenten gänzlich verschiedene Struktur vorauszusetzen.

2l) Optisches Drehungsvermögen. Besonders interessant sind die Beziehungen der Strukturtheorie zu dem Drehungsvermögen (s. den Artikel „Drehung der Polarisationsebene") vieler teilflächigen Kristalle. Nach einem von Pasteur begründeten Satz kristallisieren solche Substanzen, deren Lösungen die Ebene des polarisierten Lichtes drehen, in gewendeten Kristallen; man kann bei dieser Gruppe von Körpern annehmen, daß schon den Molekülen die spiegelbildliche Symmetrie fehle, was auch mit den Resultaten der Stereochemie im Einklang ist. Eine zweite Gruppe von Körpern dreht nur im kristallisierten Zustand, nicht aber in flüssiger

Form die Ebene des polarisierten Lichts, ihr gehören solche Körper an, bei denen die Stereochemie das Vorhandensein von spiegelbildlicher Symmetrie für die Moleküle nicht ausschließt. Hier erscheint daher die Art, wie die Formelemente im Raum gelagert sind, als Grund für das Drehungsvermögen, worauf Sohncke zuerst hinwies, indem er diejenigen Punktsysteme, welche gewendet erscheinen (also rechte und linke entgegengesetzte Exemplare aufweisen), als geeignet zur Erklärung des Drehungsvermögens erkannte. Diese Punktsysteme besitzen drei-, vier- oder sechszählige Schraubenachsen, gehören daher den drei höhersymmetrischen Kristallsystemen an und genügen nicht, falls rhombische Kristalle vorliegen. Nun ist aber z. B. für das rhombische Bittersalz festgestellt, daß es in Kristallform die Ebene des polarisierten Lichtes dreht, in Lösung aber inaktiv ist.[1]) Solange man von der räumlichen Ausdehnung der Formelemente absieht und nur „Punkt"systeme einführt, kann man lediglich im tetragonalen, hexagonalen und regulären System das Drehungsvermögen erklären; wenn man aber körperliche Formelemente im Raume gruppiert — z. B. solche von der Gestalt eines Stäbchens —, so genügen schon die Raumgitter, um auch in den niedrigersymmetrischen Systemen die Verschiedenheit der rechten und linken Strukturen zu erkennen.

2m) Löslichkeit. Die Löslichkeit der Kristalle wird von den Strukturtheoretikern als eine Funktion der Maschenweite der in den Grenzflächen gedachten Netzebenen aufgefaßt und daher als veränderlich für die verschiedenen Flächen betrachtet, obgleich aus thermodynamischen Gründen diese Veränderungen nur gering sein können. Beträchtlichere Aenderungen wären aber für die Lösungsgeschwindigkeiten denkbar. Nun hat sich gezeigt, daß für die rechten und linken gewendeten Kristalle gewisser Substanzen die Lösungseigenschaften tatsächlich ein wenig verschieden sind. E. Sommerfeldt erklärt dieses dadurch, daß die entsprechenden rechten und linken Formen nicht notwendigerweise gleich dicht mit Materie in ihren Grenzebenen besetzt zu sein brauchen.

Literatur. *L. Sohncke, Entwickelung einer Theorie der Kristallstruktur. Leipzig 1879. — E. Sommerfeldt, Geometrische Kristallographie. Leipzig 1906. — Derselbe, Physikalische Kristallographie. Leipzig 1907.*

E. Sommerfeldt.

[1]) E. Sommerfeldt fand auch Andeutungen für das theoretisch schon vorher als möglich erkannte Drehungsvermögen gewisser nichtgewendeter Kristalle und zog hieraus Schlüsse auf die Struktur solcher Substanzen.

Raummessung.

1. Raummaße. 2. Raummessung durch Wägung: a) Bestimmung äußerer Volumina. b) Bestimmung innerer Volumina. 3. Kalibrieren. 4. Volumenometer. 5. Bestimmung äußerer Volumina mit Meßzylinder oder Volumenometer.

1. **Raummaße.** Die natürliche Einheit des Raummaßes ist der Würfel, dessen Kanten von der Längeneinheit gebildet werden, also je nachdem man als Einheit 1 mm, 1 cm, 1 dm oder 1 m wählt, ein Würfel von 1 mm³, 1 cm³, 1 dm³ oder 1 m³ Inhalt. Die Etalonnierung dieses Raummaßes bietet keinen praktischen Nutzen, weil es nicht möglich ist, Räume mit einem Raumetalon auszumessen. Will man die Größe abgegrenzter Räume, Volumina, bestimmen, so muß man auf das Längenmaß zurückgreifen; man muß den Körper, dessen Volumen man sucht, in seinen Lineardimensionen ausmessen und hieraus nach geometrischen Regeln das Volumen selbst berechnen.

Die Methode ist nur auf regelmäßig gestaltete Körper anwendbar und auch hier, wenigstens mit den gewöhnlichen Hilfsmitteln, nur einer geringen Genauigkeit fähig. Mißt man beispielsweise die Kante x eines Würfels um $dx = \pm 0{,}01$ mm falsch, so erhält man dadurch das Volumen des Würfels um $\pm 3x^2dx = \pm 0{,}03x^2$ mm² falsch, das bedeutet für einen Würfel von 1 dm³ Inhalt (x = 100 mm) einen Fehler von ±300 mm³ oder ±0,03%.

Die zweite Methode der Raummessung durch Wägung (vgl. unter 2) beruht auf der Verknüpfung der Masseneinheit mit der Längeneinheit, da nach der ursprünglichen Absicht das Kilogramm die Masse von 1 dm³ Wasser im Zustande seiner größten Dichte sein soll (vgl. die Artikel „Massenmessung" und „Dichte"). In Wirklichkeit weicht das Kilogramm von dem beabsichtigten Werte ein wenig ab. Raummessungen, welche aus Wägungen abgeleitet sind, liefern das Resultat daher auch nicht in dm³, cm³ usw., sondern in einem hiervon ein wenig verschiedenen Maße, dessen Einheit das Liter (l) bildet. Teile des Liters bezeichnet man in Analogie mit den Unterabteilungen des Meters, als Deciliter (dl), Centiliter (cl), Milliliter (ml), Mikroliter (μl oder λ). 100 Liter nennt man 1 Hektoliter (hl).

Das Verhältnis zwischen Liter und Kubikdezimeter ist im Bureau international des Poids et Mesures in Sèvres mit hoher Genauigkeit ermittelt worden (vgl. den Artikel „Dichte" unter 4). Danach ist:

$$1\ l = 1{,}000028\ dm^3.$$

Im gleichen Zahlenverhältnis stehen:

1 Hektoliter und 100 Kubikdezimeter
1 Milliliter und 1 Kubikzentimeter
1 Mikroliter und 1 Kubikmillimeter.

In vielen Fällen wird man von der Unterscheidung der beiden Systeme von Raumeinheiten Abstand nehmen dürfen.

2. Raummessung durch Wägung. 2a) Bestimmung äußerer Volumina. Das äußere Volumen eines festen Körpers wird in derselben Weise durch Wägung bestimmt wie sein spezifisches Gewicht (vgl. den Artikel „Dichte" unter 2b und 3a). Hat der Körper im leeren Raume das Gewicht A, in einer Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht s_t (bei der Temperatur t^0) das Gewicht B, so ist nach dem Archimedesschen Prinzip der Gewichtsverlust A—B gleich dem Gewicht der von dem Körper verdrängten Flüssigkeitsmasse. Sind A und B in Gramm-Gewicht ausgedrückt, so wiegt ein dem Volumen des Körpers bei t^0 gleichgroßes Volumen Wasser von 4^0

$$\frac{1}{s_t}(A-B) \text{ Gramm};$$

rein zahlenmäßig ist daher das Volumen des Körpers bei 4^0

$$v_t = \frac{1}{s_t}(A-B) \text{ Milliliter.}$$

Ist endlich β der lineare Ausdehnungskoeffizient des Körpers, so wird sein Volumen bei 0^0

$$v_0 = \frac{v_t}{1+3\beta t}$$

und bei einer anderen Temperatur t_1

$$v_{t_1} = v_t \frac{1+3\beta t_1}{1+3\beta t}$$

oder mit genügender Annäherung

$$= v_t \left[1+3\beta(t_1-t)\right].$$

Hat man den Gewichtsverlust des Körpers durch Wägung in Wasser bestimmt, so sind für s_t die Werte aus der Tabelle im Artikel „Dichte" unter 5b zu entnehmen.

2b) Bestimmung innerer Volumina. Innere Volumina, Hohlvolumina, werden durch Auswägen bestimmt. Man wägt den das Hohlvolumen umschließenden Körper zunächst leer (B), dann bei der Temperatur t^0 ganz mit einer Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht s_t gefüllt (A), so ist, wenn die Wägungen auf den leeren Raum reduziert sind, wiederum

$$v_t = \frac{1}{s_t}(A-B).$$

Statt den Körper leer und gefüllt zu wägen, kann man auch das Gewicht der den Hohlraum erfüllenden Flüssigkeit durch eine gesonderte Wägung ermitteln.

Als Wägungsflüssigkeit benutzt man bei der Bestimmung größerer Hohlräume Wasser; alsdann findet auch hier die Tabelle, welche im Artikel „Dichte" unter 5b abgedruckt ist, Anwendung. Bei kleineren Hohlräumen aus Glas benutzt man Quecksilber, welches den doppelten Vorteil bietet, einerseits Glaswände nicht zu benetzen, andererseits zufolge seines höheren spezifischen Gewichts die Meßgenauigkeit zu vergrößern. Für Quecksilber kann man setzen

$$s_t = 13{,}5955(1-0{,}0001816\, t).$$

Eine Fehlerquelle bei der Auswägung der Hohlvolumina kann die gekrümmte Begrenzung der Flüssigkeitsoberflächen, der Meniskus, bilden. In einigen Fällen wird es möglich sein, den Einfluß des Meniskus zu eliminieren, wenn nämlich die Hohlraumbestimmung eine Differenzbestimmung (z. B. die Kalibrierung von Büretten; vgl. unter 3) ist, in das Resultat also auch nur die Differenz zweier gleichen Menisken eingeht. In anderen Fällen wird man den Meniskus ganz vermeiden können, wenn man z. B. den Inhalt des Hohlraumes dadurch scharf begrenzt, daß man durch Aufdrücken einer ebenen Platte auf den oberen Rand des Gefäßes alle überragende Flüssigkeit entfernt. Sind beide Verfahren nicht anwendbar, so muß man das Volumen des Meniskus passend in Rechnung setzen. Bei Wasser, das ja ohnehin nur eine geringere Genauigkeit zuläßt, wird es in der Regel genügen, den Einfluß des Meniskus abzuschätzen; für Quecksilber mag man bei Kapillarröhren und bei Röhren mäßiger Weite die Menisken als Halbkugeln in Rechnung ziehen, für größere Rohrweiten ist das Volumen des Quecksilbermeniskus durch Meniskushöhe und Rohrweite eindeutig nach folgender Tabelle bestimmbar.

Volumen eines Quecksilbermeniskus in mm^3.

Höhe des Meniskus in mm	Durchmesser des Rohres in mm 14	16	18	20	22	24
1,6	157	214	280	356	444	541
1,8	181	244	320	407	507	616
2,0	206	278	362	460	571	694
2,2	233	313	406	515	637	776
2,4	262	350	454	573	708	859
2,6	291	388	503	633	782	948

Innenvolumina sind als Hohlmaße im Deutschen Reiche eichfähig; die Eichung wird entweder direkt nach dem hier beschriebenen Verfahren des Auswägens ausgeführt, oder indirekt, indem man durch Umfüllen einer Flüssigkeit ermittelt, wie oft ein anderes bekanntes Hohlvolumen in dem unbekannten enthalten ist.

Die Hohlmaße des Handels haben meist eine zylindrische Form. Der Chemiker

gebraucht geteilte Meßzylinder und kugelförmige oder zylindrische mit Hahn abschließbare Meßgefäße, welche entweder als ganzes geeicht (Pipetten) oder durch aufgeätzte Striche unterteilt sind (Büretten). — Hohlmaße können entweder für Einlauf (Trockenfüllung) oder für Ausguß bestimmt sein. Im letzteren Falle ist zu berücksichtigen, daß ein Teil der Flüssigkeit die Innenwandung benetzend zurückbleibt, das Hohlmaß also um diesen Betrag zu groß sein muß. Die Meßgenauigkeit ist daher bei Gefäßen für Ausguß geringer als bei denjenigen für Einlauf.

Der Dimensionierung älterer Meßgefäße ist häufig noch das sogenannte Mohrsche Liter zugrunde gelegt, welches von dem scheinbaren Gewicht des Wassers von 15° in Luft abgeleitet ist. Dabei wird das Liter gegen richtiges Maß um 1,9 ml zu groß. — Eichfähig sind derartige Gefäße nicht mehr.

3. **Kalibrieren.** Unter Kalibrieren versteht man die relative Ausmessung der Unterabteilungen eines Hohlgefäßes, dessen Gesamtvolumen entweder durch Eichung bekannt ist, wie bei Büretten und Meßzylindern, oder aber, wie z. B. bei der Kapillare eines Thermometers, gar nicht interessiert. Sind die Gefäße bereits mit einer (meist gleichmäßigen) Teilung versehen, so läuft das Kalibrieren auf eine Prüfung der Teilung hinaus.

Meßzylinder und Büretten werden kalibriert, indem man das unter 2 b beschriebene Verfahren des Auswägens nicht nur für den Gesamtinhalt, sondern auch auf einzelne Teile anwendet. Soll beispielsweise eine Bürette von $^1/_{10}$ zu $^1/_{10}$ ihres Inhaltes kalibriert werden, so füllt man sie erst ganz mit dem Glas nicht benetzenden Quecksilber, zapft dann zehnmal nahezu je $^1/_{10}$ des Inhaltes bis zu den entsprechenden Teilstrichen ab und wägt die einzelnen Portionen Quecksilber. Je größer auf diese Weise die ein Intervall ausfüllende Quecksilbermenge ist, um so größer ist auch das Intervall selbst. Nach den im Artikel „Längenmessung" unter 7 angegebenen Regeln wird es leicht sein, für die einzelnen Teilstriche Korrektionen abzuleiten. Die Genauigkeit der Kalibrierung ist in diesem Falle nicht größer als diejenige der Bestimmung des Gesamtvolumens.

Enge Glasröhren, insbesondere Kapillarröhren werden kalibriert, indem man einen Quecksilberfaden von passender Länge durch das Rohr verschiebt und seine dabei auftretenden Längenänderungen beobachtet. Will man beispielsweise auch hier eine Röhre von $^1/_{10}$ zu $^1/_{10}$ ihres Inhaltes kalibrieren, so wählt man den Quecksilberfaden nahezu gleich $^1/_{10}$ der Länge der ganzen Röhre und bringt ihn der Reihe nach in alle diejenigen Lagen, in denen seine beiden Enden mit den Enden der Zehntelunterabteilungen zusammenfallen. Zu beachten ist, daß umgekehrt wie bei der Bürette der größeren Länge des Quecksilberfadens das kleinere Intervall entspricht. Aus den beobachteten Längen des Quecksilberfadens ergeben sich wieder die Korrektionen der Intervalle bezw. der einzelnen Striche.

Die Kalibrierung einer Glasröhre durch Verschieben eines Quecksilberfadens ist im Vergleich zur Bestimmung des Gesamtinhaltes der Röhre einer sehr hohen Genauigkeit fähig. Man kann die Genauigkeit noch mehr vergrößern, wenn man sich nicht mit der Beobachtung eines Quecksilberfadens von $\frac{1}{n}$ (im Beispiel $\frac{1}{10}$) der Gesamtlänge der Röhre begnügt, sondern außerdem Fäden von $\frac{2}{n}, \frac{3}{n} \ldots \frac{n-1}{n}$ Röhrenlänge, immer wieder die Enden mit den Enden der n-tel Unterabteilungen zusammenfallend, in allen möglichen Stellungen beobachtet. Die Methode der Kalibrierung erhält dann große Aehnlichkeit mit der im Artikel „Längenmessung" unter 7 genannten erweiterten Hansenschen Methode zur Bestimmung der inneren Teilungsfehler von Maßstäben. Das Kaliber vertritt hier die Stelle der zu untersuchenden Skale, indem die metromisch als fehlerfrei vorausgesetzte Teilung hinsichtlich des Kalibers als mit Fehlern behaftet vorausgesetzt wird, die zu bestimmen sind. Die Teilung ist die Hilfsskale; ihre Verschiebung, die nach der Hansenschen Methode nötig würde, wird dadurch unnötig gemacht, daß verschiedene nominell gleichlange Teile der Skale innerhalb der Beobachtungsfehler auch in Wirklichkeit einander gleich sind.

4. **Volumenometer.** Vielfach sind Hohlräume einer direkten Ausmessung durch Wägung nicht zugänglich; Beispiele hierfür sind die sogenannten „schädlichen Räume" bei Gasthermometern, d. h. die Volumina der Verbindungsleitungen zum Manometer sowie der Raum oberhalb der Quecksilberkuppe des Manometers, ferner der Inhalt eines an einen Gasmeßraum angeschlossenen Membran- oder Quecksilbermanometers u. a. m. Um diese Räume zu bestimmen, bedient man sich der Gültigkeit des Mariotteschen Gesetzes, welches besagt, daß für eine abgegrenzte Gasmenge bei Vergrößerung oder Verkleinerung des Volumens v des Gases sich der Druck p stets in der Weise ändert, daß das Produkt pv konstant bleibt; mit anderen Worten, sind p_1 und v_1 sowie p_2 und v_2 zusammengehörige Zustände einer und derselben Gasmenge, so ist $p_1v_1 = p_2v_2$.

Man verfährt nun in der Art, daß man mit dem unbekannten Hohlraum V_x bekannte, durch Auswägen bestimmte Volumina V_a,

V_b ... in Verbindung bringt. Betrachten wir den einfachsten Fall, daß nur ein solches Zusatzvolumen V_a vorhanden ist. Wir füllen das System $V_x + V_a$ mit einer Gasmenge, am einfachsten mit verdünnter Luft, und bestimmen den Druck im ganzen System mittels eines zugeschalteten Manometers zu P_{x+a}. Der Raum V_a sei nun ebenso wie die Kugel einer Töplerschen Quecksilberluftpumpe (vgl. den Artikel „Luftpumpen") mit einer Niveaukugel verbunden, welche erlaubt, die Luft im Raum V_a durch Quecksilber zu verdrängen. Tut man das so wird alle bisher in V_a befindliche Luft nach V_x hinübergetrieben; infolgedessen steigt der Druck in V_x und nimmt, wie durch Ablesung am Manometer festgestellt werden kann, den Wert $P_x > P_{x+a}$ an. Dann ist nach dem Mariotteschen Gesetze

$$P_{x+a}(V_x + V_a) = P_x V_x$$

woraus folgt:

$$V_x = \frac{P_{x+a}}{P_x - P_{x+a}} \cdot V_a.$$

Ein Zahlenbeispiel möge das Gesagte erläutern: Ein schädliches Volumen V_x war mit drei Zusatzvolumina $V_a = 200$, $V_b = 100$, $V_c = 420$ ml verbunden, die mit V_x in den Kombinationen $V_x + 200$, $V_x + 300$, $V_x + 720$ vereinigt werden konnten. Es wurden folgende zusammengehörige Werte beobachtet:

1)	V_x	$P_x = 216{,}10$ mm
2)	$V_x + 200$ ml	$P_{x+200} = 122{,}85$ mm
3)	$V_x + 300$ ml	$P_{x+300} = 101{,}06$ mm
4)	$V_x + 720$ ml	$P_{x+720} = 57{,}89$ mm

Dann folgt:

$$\text{aus 1) u. 2)}\ V_x = \frac{122{,}85}{216{,}10 - 122{,}85} \cdot 200\,\text{ml} = 263{,}49\,\text{ml}$$

$$\text{„ 1) u. 3)}\ V_x = \frac{101{,}06}{216{,}10 - 101{,}06} \cdot 300\,\text{ml} = 263{,}54\,\text{ml}$$

$$\text{„ 1) u. 4)}\ V_x = \frac{57{,}89}{216{,}10 - 57{,}98} \cdot 720\,\text{ml} = 263{,}44\,\text{ml}$$

Die Einzelmessungen stimmen recht gut überein und ergeben als Mittelwert

$$V_x = 263{,}5 \text{ ml}.$$

Eine Fehlerquelle bei volumenometrischen Messungen können Temperaturänderungen bilden, welche bei Volumänderungen des Gases infolge der Kompressionswärme auftreten; denn bei mangelnder Temperaturkonstanz verliert das Mariottesche Gesetz seine Gültigkeit und muß durch das für den vorliegenden Zweck sehr viel unbequemer zu benutzende Gay-Lussacsche Gesetz (vgl. die Artikel „Aggregatzustände" und „Gase") ersetzt werden. Man verringert die Temperatureinflüsse, wenn man mit sehr kleinen Gasdrucken arbeitet; freilich steigen dadurch die Anforderungen an die Genauigkeit der Druckmessung.

5. **Bestimmung äußerer Volumina mit Meßzylinder oder Volumenometer.** Wird eine große Genauigkeit nicht verlangt, so kann man das äußere Volumen eines festen Körpers dadurch bestimmen, daß man ihn in einen mit Flüssigkeit gefüllten Meßzylinder einsenkt. Die Differenz des Flüssigkeitsstandes vor und nach dem Einsenken des Körpers, an der Teilung des Meßzylinders abgelesen, liefert direkt das Volumen des Körpers.

Die Methode läßt sich dadurch verfeinern, daß man den Körper, dessen Gewicht im Vakuum gleich A gefunden sein möge, in ein Wägefläschchen (Pyknometer; vgl. den Artikel „Dichte" unter 2e und 3b) einbringt und dieses vorher und nachher ganz mit Wasser gefüllt wägt. Ist die Gewichtszunahme durch Einbringen des Körpers (wobei also Wasser gleich dem Volumen des Körpers austritt) gleich a, so ist, abgesehen von Temperaturkorrektionen (vgl. hierüber unter 2), A—a das Volumen des Körpers in Millilitern, wenn A und a in Gramm-Gewicht gerechnet sind.

Die Bestimmung eines äußeren Volumens mit dem Volumenometer beruht darauf, daß man nach der unter 4 beschriebenen Methode das innere Volumen eines Gefäßes einmal ohne, einmal mit dem Körper unbekannten Volumens ermittelt. Die Differenz gibt die gesuchte Größe. Für den gedachten Zweck sind eine Reihe bequemer Apparate ersonnen worden, worüber die Lehrbücher der Physik nähere Angaben machen. Bei der Konstruktion solcher Volumenometer ist darauf Bedacht zu nehmen, die Meßgefäße so groß zu bauen, daß sie die Einführung der zu messenden Körper gestatten, dabei aber das Volumen des Meßgefäßes selbst scharf und eindeutig zu begrenzen. Man erreicht das durch aufgeschliffene Deckel oder eingeriebene Stöpsel. — Die Volumbestimmung mit dem Volumenometer beschränkt sich auf poröse Körper und solche, welche durch Wasser und andere Flüssigkeiten angegriffen werden; sie ist keiner großen Genauigkeit fähig.

Literatur. *Kohlrausch, Praktische Physik. Leipzig. — Scheel, Grundlagen der praktischen Metronomie. Braunschweig 1911.*

K. Scheel.

Raum- und Zeitwahrnehmung

siehe den Artikel „Zeit- und Raumsinn".

Reagens.

Als Reagenzien auf einen Bestandteil (siehe den Artikel „Chemische Analyse,

anorganische Analyse" 2) finden Stoffe (oder Stoffgemische) Verwendung, die mit dem gesuchten Bestandteil bestimmte besonders sinnfällige Erscheinungen (Färbung, Niederschlag, Gasentwickelung, ein riechendes Produkt und ähnliches) geben. Wenn die Erscheinung für einen Bestandteil charakteristisch ist, spricht man von spezifischen Reagenzien im Gegensatz zu Gruppenreagenzien, durch die eine Gruppe von verwandten Bestandteilen angezeigt und von anderen Bestandteilen getrennt werden kann (siehe den Artikel „Chemische Analyse, anorganische Analyse" 6).

Réaumur
René-Antoine, Ferchault de.

Geboren am 28. Februar 1683 zu La Rochelle, gestorben am 17. Oktober 1757 auf seinem Landgute Bermondière in der Landschaft Maine. Er studierte anfangs Jurisprudenz, wandte sich aber dann den Naturwissenschaften zu. 1703 kam er nach Paris, wo er schon mit 25 Jahren in die Akademie der Wissenschaften aufgenommen wurde. Seine Forschertätigkeit war eine außerordentlich vielseitige; sowohl auf dem Gebiete der Physik wie auch in der Zoologie ist sein Name noch heute jedermann bekannt. Den größten Ruhm auf physikalischem Gebiete erwarb er sich durch sein Weingeistthermometer im Jahre 1730, das mit Hilfe des Gefrier- und Siedepunkts des Wassers graduiert war und die nach ihm benannte 80-teilige Skala aufwies, die auch beibehalten wurde, als man später den Weingeist mit dem Quecksilber vertauschte. Auf zoologischem Gebiete beschäftigte er sich mit dem Lieblingsobjekte der damaligen Zeit, den Insekten. Seine Abhandlungen über diesen Gegenstand sind erschienen unter dem Titel: Mémoires pour servir à l'histoire naturelle des insectes" (6 Bde., Paris, 1734 bis 1742). Sie zeichnen sich besonders aus durch die vielseitige Berücksichtigung der Biologie und der Entwickelungsgeschichte. Besonders wertvoll sind auch seine ungemein scharfsinnigen und exakten Beobachtungen über das gesellige Leben der sozialen Insekten und über die Beziehungen der Insekten zu den Pflanzen. Er ist es auch gewesen, der die Zusammensetzung des Bienenstaates aus Königin, Arbeiterinnen und Drohnen einwandfrei festgestellt hat. Er bediente sich zuerst bei seinen Beobachtungen der gläsernen Wände bei seinen Stöcken, durch welche er die Bienen arbeiten sehen konnte. Er stellte so fest, daß die früher zumeist als König bezeichnete Biene das einzige Weibchen des Stockes sei. Die Arbeiter erkannte er als unfruchtbar bleibende Weibchen und die früher als Fuci bezeichneten Individuen als Männchen oder Drohnen. Auch erkannte er schon, daß jede Arbeiterbienenlarve durch reichliche Ernährung zur Königin werden könne. Die wahre Natur der drei Bienenformen war übrigens auch schon durch Swammerdam durch Zergliederung erkannt worden, so daß sich hier also die biologische Forschungsweise aufs glücklichste mit der anatomischen ergänzte. Auch die Naturgeschichte der niederen Tiere, namentlich der Polypen, hat er wesentlich gefördert. Seine 1709 in den Memoiren der Akademie erschienene Schrift: „De la formation et de l'accroissement des coquilles des animaux" zeigte schon ganz richtig, daß die Schalen der schalentragenden Tiere durch Erhärten eines Saftes entständen, der aus dem Körper der Tiere stammt. Sein reichhaltiges Museum in Paris ging später an den Jardin des plantes über.

Literatur. **Carus**, *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — **Burckhardt**, *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.* — **Grandjean de Fouchy**, *Eloge de R.-A. Ferchault de R., in Mém. Acad. sc. Hist. 1757, p. 201.* — *Vgl. auch Correspondance inédite entre Réaumur et Abraham Trembley rélative à la découverte des Polypes d'eau douce (herausgeg. v. M. Trembley). Paris 1904.*

W. Harms.

Rechenmaschinen und Rechenhilfsmittel.

1. Rechenmaschinen: a) Reine Additionsmaschinen. b) Eigentliche Rechenmaschinen. 2. Rechenschieber: a) Allgemeine Theorie. b) Der logarithmische Rechenschieber. 3. Sonstige Rechenhilfsmittel.

1. Rechenmaschinen. 1a) Reine Additionsmaschinen (Komptometer). Sie dienen zur Addition (bezw. Subtraktion) mehrstelliger Zahlen.

Auf einer rechteckigen Platte befindet sich für jede Stelle eine vertikale Reihe von 10 Knöpfen, die die Ziffern 0 bis 9 tragen. Durch Niederdrücken je eines Knopfes jeder Vertikalreihe lassen sich mehrstellige Zahlen darstellen, die durch Niederdrücken eines Hebels oder dergl. nacheinander in einem Zählwerk addiert werden. Eventuell werden die einzelnen Summanden und das Resultat auf einem Papierstreifen abgedruckt.

Das Zählwerk hat „Zehnerübertragung", d. h. einen Mechanismus, der bewirkt, die nächsthöhere Stelle im Resultat um eine Einheit zu vergrößern, wenn in der vorhergehenden Stelle die Ziffer 9 überschritten wird (diese Maschinen werden häufig in kaufmännischen Betrieben angewendet).

1b) Eigentliche Rechenmaschinen. Im Prinzip sind diese auch Additionsapparate. In einem „Stellwerk" wird eine Zahl z_1 durch Knöpfe, die über Ziffernreihen gleiten (für jede Stelle eine) eingestellt. Die einmalige Umdrehung einer Kurbel bewirkt (wie bei 1a) eine Übertragung dieser Zahl z_1 in ein „Zählwerk", das Zehnerübertragung

besitzt. Die jeweilige Stellung des Zählwerks kann an einer in Schaulöchern erscheinenden Ziffernreihe abgelesen werden. Dreht man die Kurbel n-mal herum, so wird die Zahl z_1 n-mal ins Zählwerk übertragen und durch den Additionsmechanismus desselben erscheint die Zahl $z = z_1 . n$ daselbst (um die Maschine zur Addition verschiedener Zahlen zu benutzen, stellt man diese nacheinander im Zählwerk ein und dreht die Kurbel darauf je einmal herum).

Dreht man die Kurbel im anderen Sinne, oder betätigt man eine Umschaltung, so wird die im Stellwerk eingestellte Zahl z_1 von einer bereits im Zählwerk stehenden Zahl subtrahiert.

Die Anzahl der Kurbelumdrehungen wird in einem „Drehwerk" (auch „Quotientwerk" genannt) durch Ziffern dargestellt.

Bei Multiplikationen zweier Zahlen hat man also einen Faktor im Stellwerk einzustellen und so oft zu kurbeln, bis der andere Faktor im Drehwerk erscheint.

Ist dieser Faktor mehrstellig, so würde aber die ihm gleiche Anzahl von Kurbeldrehungen zu viel Zeit beanspruchen. Auch müßte das Drehwerk mit Zehnerübertragung ausgerüstet sein, was sonst nicht notwendig ist.

Man hat hier nun den Ausweg gefunden, das Zählwerk (und mit diesem zusammen auch das Drehwerk) gegen das Stellwerk verschiebbar anzuordnen. Dadurch wird bewirkt, daß die Einer der im Stellwerk eingestellten Zahl nacheinander mit den Einern, Zehnern, Hunderten usw. der Zahl im Zählwerk korrespondieren. Eine Umdrehung der Kurbel bewirkt dann, je nach der Stellung von Zähl- und Stellwerk zueinander, die Addition des Zehnfachen (Hundertfachen usw.) der im Stellwerk eingestellten Zahl im Zählwerk. Dies äußert sich auch im Drehwerk, in dem hier jetzt jede Kurbelumdrehung die Zehnerstelle um eine Einheit vermehrt (bezw. die Hunderterstelle usw.).

Um also beispielsweise eine im Stellwerk eingestellte Zahl mit 235 zu multiplizieren, stellt man zunächst das Zählwerk so, daß dessen Einerstelle mit der Einerstelle des Stellwerks korrespondiert und kurbelt fünfmal. Hierauf rückt man das Zählwerk eine Stelle weiter, so, daß seine Zehnerstelle mit der Einerstelle des Stellwerks korrespondiert und kurbelt dreimal. Dann wird das Zählwerk wieder um eine Stelle weitergeschaltet und zweimal gedreht (man kann natürlich auch von links anfangen).

Im Drehwerk ist hierbei die Zahl 235 erschienen.

Es gilt also die Multiplikationsregel: Ein Faktor im Stellwerk, der andere Faktor im Drehwerk: das Resultat im Zählwerk.

Durch folgende Kunstgriffe kann man die Anzahl der Kurbelumdrehungen vermindern: 1. Man stellt den Faktor mit der größeren Quersumme wenn möglich im Stellwerk ein. 2. Statt bei einer Stelle z. B. achtmal zu kurbeln, kurbelt man zweimal rückwärts und kurbelt bei der nächsthöheren Stelle eins mehr vorwärts (d. h. man multipliziert statt mit 8, hintereinander mit $(-2+10)$).

Jede Rechenmaschine hat noch Löschvorrichtungen für jedes Werk, um nach Abschluß einer Rechnung alle Ziffern auf Null stellen zu können.

Bei der Division wird der Dividendus im Zählwerk eingestellt, der Divisor im Stellwerk und durch Rückwärtskurbeln (oder nach Umlegen des Umschalthebels) wird, genau wie beim gebräuchlichen Dividieren, der Divisor vom Dividendus abgezogen, wobei man das Zählwerk zunächst so verschiebt, daß die höchsten Stellen der beiden Zahlen korrespondieren. Sobald ein Abziehen bei dieser Stellung nicht mehr möglich ist, rückt man das Zählwerk eine Stelle weiter. Schließlich erscheint der gesuchte Quotient im Drehwerk (daher die Bezeichnung „Quotientwerk").

Beim Ziehen einer Quadratwurzel empfiehlt sich bei der Rechenmaschine folgendes Näherungsverfahren.

Soll aus einer Zahl a die Quadratwurzel gezogen werden, so stellen wir a im Zählwerk ein und suchen, am besten mit dem Rechenschieber, für die Wurzel $x = \sqrt{a}$ einen Näherungswert x_1.

Diesen Näherungswert dividieren wir in a, es erscheint also $\frac{a}{x_1}$ im Drehwerk. Jetzt bilden wir aus x_1 und $\frac{a}{x_1}$ das arithmetische Mittel $\frac{1}{2} \cdot \left(x_1 + \frac{a}{x_1}\right) = x_2$.

Dies ist leicht auszuführen, weil der Näherungswert ja aus 2—3 Ziffern und sonst lauter Nullen besteht. Man addiert zweckmäßig zu x_1 die halbe Differenz $\frac{1}{2}\left(\frac{a}{x_1} - x_1\right)$. — Stimmen x_1 und $\frac{a}{x_1}$ in den ersten m-Ziffern (von inks nach rechts gerechnet) überein, so ist das Mittel x_2 ein zweiter Näherungswert für die Wurzel, dessen 2m erste Ziffern richtig sind.

In den meisten Fällen wird diese Genauigkeit genügen. Sonst behandelt man x_2 noch einmal so wie vorher x_1. Dabei ist es zweckmäßig im Zählwerk und Drehwerk zu löschen, x_2 im Stellwerk einzustellen, wo ja schon m Ziffern stehen, und zunächst

so zu verfahren, als ob man x_2 mit sich selbst multiplizieren wollte, wobei aber von links anzufangen ist. Bei den letzten Stellen kurbelt man jedoch so, daß gerade a im Zählwerk erscheint. Dann steht im Drehwerk $\frac{a}{x_2}$ und das Mittel $\frac{1}{2}\cdot\left(x_2+\frac{a}{x_2}\right)=x_3$ ist ein Näherungswert, dessen 4m erste Ziffern richtig sind. — Andere Verfahren zum Radizieren findet man in den Gebrauchsanweisungen.

Das Komma kann an den drei Werken durch kleine Stifte oder Zeiger markiert werden. Um die zusammengehörigen Stellungen des Komma in den drei Werken zu finden, ist es zweckmäßig, die Multiplikation 1.1=1 auszuführen. Das Komma gehört dann hinter die in jedem Werk stehende 1.

Am gebräuchlichsten sind in Deutschland: 1. Brunsviga, konstruiert von d'Odhner. 2. Der Arithmometer von Burkhardt, dessen Prinzip auf einer Erfindung von Leibniz basiert. 3. Eine weitere Vervollkommnung der letzteren Maschine ist eine Steiger und Egli in Zürich patentierte Maschine „Millionär".

Rechenmaschine Brunsviga (Fig. 1). Das Gehäuse trägt ungefähr in mittlerer Höhe 9 vertikale Schlitze, in denen ebenso viele, mit weißen Handgriffen versehene,

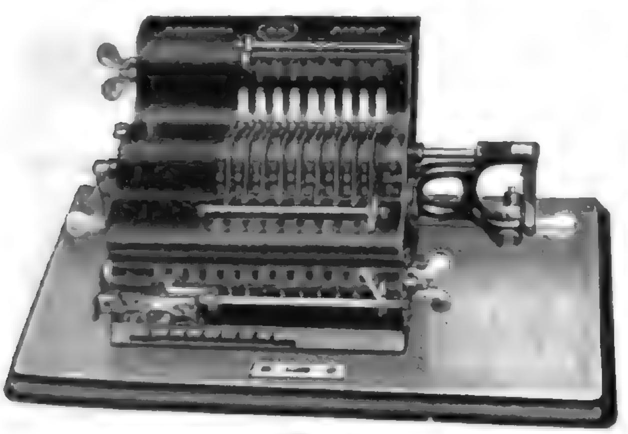


Fig. 1.

Hebel gleiten. Diese gehören zum Stellwerk. Indem man die Hebel der Reihe nach auf die neben den Schlitzen befindlichen Ziffern einstellt, kann man die vorgegebene Zahl im Stellwerk fixieren.

Der besseren Uebersichtlichkeit wegen erscheint diese Zahl noch einmal mit nebeneinanderstehenden Ziffern in den über dem Stellwerk sichtbaren Schaulöchern.

Das Zählwerk liegt ganz unten, und zu ihm gehört die unterste Reihe von Schaulöchern. Vermittels des links unten sichtbaren Knopfes kann das Zählwerk in horizontaler Richtung gegen das Stellwerk verschoben werden.

Ebenfalls auf dem beweglichen Teil des Apparats, über dem Zählwerk, sieht man eine Reihe von Schaulöchern, die zum Drehwerk gehören.

Ganz rechts ragt aus der Maschine eine Kurbel heraus, die zur Inbetriebsetzung dient. Durch verschiedene Umdrehungsrichtung dieser Kurbel wird die Addition oder Subtraktion ausgeführt.

Die Anzahl der Kurbeldrehungen wird im Drehwerk abgelesen. Neuere Ausführungen der Maschine haben unmittelbar rechts vom Stellwerk ein Schauloch, das den Drehsinn der letzten Umdrehung anzeigt.

Die rechts neben dem Zählwerk und links oben neben dem Stellwerk sichtbaren Flügelschrauben betätigen die Löschvorrichtungen der betreffenden Werke.

Die Maschine hat den, bei Divisionen fühlbaren, Nachteil, im Zählwerk keine Zahl direkt einstellen zu können, sondern der Dividendus muß erst im Stellwerk eingestellt und darauf durch einmalige Kurbelumdrehung in das Zählwerk übertragen werden.

Die Maschine wird in sehr viel verschiedenen Ausführungen (z. B. mit Schreibwerk) in den Handel gebracht.

Der Arithmometer von Burkhardt wird von der Rechenmaschinenfabrik A. Burkhardt-Glashütte in den Handel gebracht.

Auf Fig. 2 sieht man unten 6 vertikale Schlitze, in denen Knöpfe auf- und abgeschoben werden können. Dies ist das Stellwerk. Rechts davon ist die Kurbel sichtbar, die nur rechts herum gedreht werden kann. Zur Umschaltung von Addition und Subtraktion dient ein links vom Stellwerk sichtbarer Knopf.

Im oberen Teile der Maschine liegt ein bewegliches Lineal, das zwei Reihen von Schaulöchern zeigt. Die obere Reihe gehört zum Zählwerk, die untere Reihe zum Drehwerk. Ganz rechts am Lineal sieht man zwei in Langlöchern verschiebbare Knöpfe, die zum Löschen der Ziffern des Zähl- und Drehwerks dienen.

Sowohl im Zähl- als im Drehwerk können vermittels der unter den Schaulöchern sichtbaren Knöpfe beliebige Zahlen direkt eingestellt werden.

Rechenmaschine „Millionär" von Steiger und Egli in Zürich (Fig. 3). In der Mitte der oberen Hälfte der Maschine sieht man das Stellwerk: Acht vertikale Schlitze, in denen Knöpfe auf und ab geschoben werden. Unter diesen Schlitzen befindet sich noch eine Reihe von acht Schaulöchern. Hier erscheinen die durch die Knöpfe im Stellwerk eingestellten Ziffern der besseren Uebersichtlichkeit wegen nebeneinander.

Rechts vom Stellwerk sieht man eine Kurbel, durch deren Drehung die Multipli-

kation bewirkt wird. Bei dieser Maschine ist jedoch für jede Stelle des Faktors die Kurbel nur einmal herumzudrehen. Darin liegt der Vorteil dieser Konstruktion.

Statt die Kurbel so oft zu drehen, als es die betreffende Ziffer des Faktors verlangt, wird der links vom Stellwerk befindliche

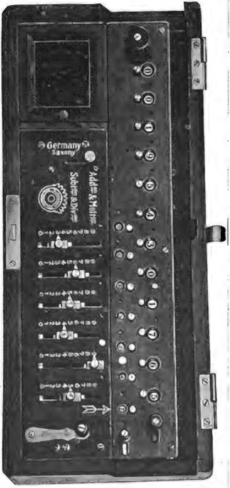


Fig. 2.

Hebel auf die gewünschte Zahl eingestellt und darauf die Kurbel einmal herumgedreht. — Unter den Schaulöchern des Stellwerks befinden sich die des Drehwerks (in dem jetzt nicht die Anzahl der Kurbelumdrehungen erscheint, sondern die aufeinanderfolgenden Stellungen des vorerwähnten Hebels angezeigt werden). Unter dem Drehwerk sind, mit diesem zusammen horizontal verschiebbar, die Schaulöcher des Zählwerks sichtbar. Ein weiterer Vorteil dieser Maschine liegt noch darin, daß Zähl- und Drehwerk nach jeder Kurbelumdrehung automatisch eine Stelle nach rechts geschoben werden, so daß bei der Handhabung die linke Hand den Stellhebel, die rechte Hand die Kurbel nicht zu verlassen braucht.

Der Knopf zwischen Kurbel und Stellwerk dient zur Umschaltung von Multikation auf Division, so daß die Kurbel stets in demselben Sinne gedreht wird. Der Knopf hat außer den Stellungen „Multiplikation" und „Division" noch zwei für „Addition" und „Subtraktion". Bei diesen wird die automatische Fortstellvorrichtung des Zählwerks ausgeschaltet, so daß die Maschine als reine Additionsmaschine funktioniert.

Natürlich gibt es außer den vorerwähnten drei Maschinen noch eine große Anzahl anderer Konstruktionen, über deren Bau und Handhabung die Prospekte der Firmen Auskunft geben.

2. Rechenschieber. 2a) Allgemeine Theorie. Jeder Rechenschieber basiert auf der Darstellung einer Funktion einer Veränderlichen durch eine Skala.

Es sei y eine Funktion von x. Wir bestimmen zu äquidistanten Werten von x, etwa $x_0=0$; $x_1=1$ $x_2=2$, $x_3=3$;.... die zugehörigen Zahlwerte y_0, y_1, y_2... Diese Funktionswerte y stellen wir dar durch Strecken, unter Zugrundelegung einer geeigneten Maßeinheit von 1mm Länge.

Die einzelnen Strecken haben also die Längen von $y_0.1.mm$, $y_1.1.mm$, $y_2.1.mm$ usw. Wir tragen all diese Strecken von ein und demselben Nullpunkt N aus auf einer Geraden ab, positiv nach der einen, negativ nach der entgegengesetzten Richtung. Die Endpunkte der Strecken seien A_0; A_1; A_2...., so daß also:

$$NA_0 = y_0.1mm$$
$$NA_1 = y_1.1mm$$
$$NA_2 = y_2.1mm$$

wird.

An die Strecken-Endpunkte werden nun die Ziffern herangeschrieben die den Wert des Argumentes x der Funktion angeben. Beim Punkte A_0 steht also die Zahl x_0, beim Punkte A_1 steht die Zahl x_1 usf. (siehe Fig. 4).

Die so entstandene bezifferte Punktreihe N; A_0, A_1, A_2.... stellt die Funktion y von x dar. Um z. B. den Wert der Funktion für

$x = x_i$ zu finden, sucht man den Punkt A_i, der die Zahl x_i trägt, und mißt die Strecke NA_i mit der Einheit 1.

Die erhaltene Maßzahl $y_i = \frac{NA_i}{1\,mm}$ ist der gesuchte Funktionswert zum Argument x_i. Brächte man neben der soeben konstruierten Punktreihe N; A_0, A_1, A_2.... einen gewöhnlichen Längenmaßstab mit einer Einheitslänge von 1 mm an, so könnte man an ihm die Werte von y direkt ablesen.

Um zwischen den aufgetragenen Funktionswerten genügend genau interpolieren zu können, muß man die Auswahl der äquidistanten Werte der unabhängigen Variablen x und die Längeneinheit 1 geeignet gegeneinander berücksichtigen.

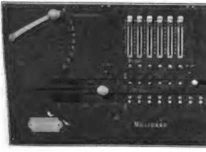


Fig. 3.

Wir betrachten jetzt zwei derartige Skalen. Die erste soll eine Funktion $y = f(x)$ darstellen unter Zugrundelegung einer Längeneinheit von 1 mm. Ihr Nullpunkt sei N_1 genannt, und die Teilpunkte seien für die Werte x_0, x_1, x_2.... erhalten (die Buchstaben A_2 lassen wir jetzt weg, da die Punkte ja durch die Zahlen x_2 bezeichnet sind).

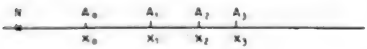


Fig. 4.

Die zweite Skala soll eine Funktion $y = g(\xi)$ darstellen mit einer Längeneinheit von k mm. Ihr Nullpunkt sei N_2 und an den Teilpunkten stehen die, jetzt ξ genannten, Zahlwerte der unabhängigen Variablen.

Wir schneiden jetzt die beiden Skalen aus dem Papierblatt heraus und legen sie zunächst so aneinander, daß die Nullpunkte N_1 und N_2 zusammenfallen und die positiven Richtungen dieselben sind (Fig. 5).

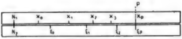


Fig. 5.

Wenn wir nun einen Punkt P ins Auge fassen, so steht hier auf der ersten Skala eine Zahl x_p und es ist $\overline{N_1}P = 1 . y_p$ mm $= 1 . f(x_p)$ mm.

Auf der zweiten Skala steht bei P eine Zahl ξ_p und es ist $\overline{N_2}P = k . y_p$ mm $=$ $k . g(\xi_p)$. mm. Da nun N_1 und N_2 zusammenfallen, gilt für x_p und ξ_p die Gleichung:

$$1 . f(x_p) = m . g(\xi_p)$$

Dieser Zusammenhang besteht aber zwischen allen Werten von x und ξ, die einander gegenüberstehen.

Durch die Nebeneinanderstellung der Skalen ist also eine Beziehung zwischen x und ξ, eine Funktion $F(x, \xi) = 0$ zwischen diesen Größen dargestellt, nämlich:

$$1 . f(x) - k . g(\xi) = 0 \quad 1)$$

Jetzt verschieben wir die zweite Skala um ein Stück gegen die erste und betrachten wieder einen Punkt Q, der die Zahlen x_q auf der oberen und ξ_q auf der unteren Skala trägt (siehe Fig. 6).

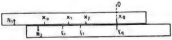


Fig. 6.

Es ist:

$$\overline{N_1}Q = 1 . f(x_q) \text{ und } \overline{N_2}Q = k . g(\xi_q)$$

also gilt zwischen x_q und ξ_q die Gleichung:

$$1 . f(x_q) - k . g(\xi_q) = a \quad 2)$$

Hierin ist a der Abstand zwischen N_1 und N_2 in mm gemessen.

Offenbar gilt diese Gleichung (2) für alle einander gegenüberstehenden Zahlen x und ξ:

$$1 . f(x) - k . g(\xi) = a$$

Die Konstante a, die ja die Verschiebung der Skalen gegeneinander ausdrückt, können wir ersetzen durch ein Paar x_p und ξ_p sich bei einer bestimmten Stellung der

Skalen gegenüberstehender Zahlen. Damit wird die Gleichung:

$$l.f(x) - k.g(\xi) = l.f(x_P) - k.g(\xi_P) \qquad 2a)$$

und wir deuten sie so: „Stehen sich bei einer Stellung der Skalen irgendwo zwei Zahlen x_P und ξ_P gegenüber, so gilt für alle anderen sich gegenüberstehenden Zahlen x und ξ die Gleichung 2a.

Schließlich können wir die beiden Skalen noch in der Weise aneinanderlegen, daß die positive Richtung der einen Skala der positiven Richtung der anderen entgegengesetzt ist (siehe Fig. 7).

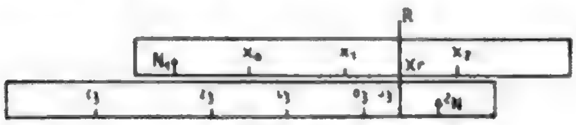


Fig. 7.

Liegen jetzt an einem Punkte R zwei Zahlen x_R und ξ_R gegenüber, so ist:

$$l.f(x_R) + k.g(\xi_R) = b$$

und allgemein gilt für gegenüberstehende Zahlen x und ξ:

$$l.f(x) + k.g(\xi) = l.f(x_R) + k.g(\xi_R) \qquad 3a)$$

wenn sich irgendwo x_R und ξ_R gegenüberstehen.

Im allgemeinen wird man, sofern f(x) und g(ξ) nicht periodische Funktionen sind, bei endlicher Länge der Skalen nur bestimmte Bereiche der Variablen darstellen und benutzen können.

2b) Der logarithmische Rechenschieber. Wir unterscheiden beim logarithmischen Rechenschieber der gebräuchlichen Form 1. den Stab, 2. die Zunge, 3. den Läufer (ein Schieber mit Indexmarke auf Glas geritzt).

Der Stab trägt 2 Skalen.

Skala I (oben) stellt die Funktion f(x) = log x dar mit einer Einheit von 1mm.

Skala II (unten) stellt die Funktion g(x) = logx dar mit einer Einheit von l_2 = 2.1mm.

Dieselben beiden Skalen I und II trägt auch die „obere“ Seite der Zunge.

Bei einer logarithmischen Skala haben wir den Vorteil, daß eine Skala von endlicher Länge ausreicht, um alle Funktionswerte mit gleicher relativer Genauigkeit darzustellen:

Denken wir uns als äquidistante Werte von x im Intervall 1 bis 10 die Werte 1, 2, 3, 4....9, 10 gewählt, im Intervall 10 bis 100 die Werte 10, 20 30,....90, 100, im Intervall 100 bis 1000 die Werte 100, 200, 300....900, 1000 usw. (das gleiche gilt für die negativen Potenzen von 10), so erhalten wir für jedes dieser Intervalle Skalenabschnitte, die unter sich kongruent sind (siehe die Skala I vom Stabe!).

Je nach dem Intervall, in dem die gebrauchten Zahlwerte liegen, können wir also die Skalen des Rechenschiebers als gerade in Betracht kommende Stücke eines unendlich lang zu denkenden Rechenschiebers ansehen.

Die vorher abgeleiteten Gleichungen 1, 2a und 3a haben hier folgende Bedeutungen:

1. Wenn wir (vermittels des Läufers) auf dem Stabe zwei auf den Skalen I und II gegenüberliegende Zahlen x (oben) und ξ (unten) ins Auge fassen, so gilt die Gleichung 1.

Ablesung I

$$1.\log x = 2.1.\log \xi \text{ d. h. } x = \xi^2$$

2. Bei aufrechter (normaler) Stellung der Zunge, gilt für eine Stellung derselben:

a) wenn wir x an der Skala I des Stabes und ξ an der Skala I der Zunge ablesen (oder beide Skalen II benutzen):

Ablesung II

Gl. 2a) $1.\log x - 1.\log \xi = 1.\log x_0 - 1.\log \xi_0$

d. h. $\frac{x}{\xi} = \frac{x_0}{\xi_0}$. Stehen sich an einer Stelle x_0 und ξ_0 gegenüber, so haben alle sich gegenüberstehenden Zahlen das gleiche Verhältnis. Hierin ist auch Multiplikation und Division einbegriffen:

Um a = b.c zu finden, macht man x_0 = b; ξ = c und ξ_0 = 1.

Um $a = \frac{b}{c}$ zu finden, macht man ξ = 1; x_0 = b und ξ_0 = c.

a) Liest man x an der Skala I des Stabes und ξ an der Skala II der Zunge ab, so hat man:

Ablesung III

$$1.\log (x) - 2.1 \log \xi = 1.\log x_0 - 2.1.\log \xi_0$$

d. h. $\frac{x}{\xi^2} = \frac{x_0}{\xi_0^2}$

3. Steckt man die Zunge umgekehrt in den Stab, so daß die Zungenskalen auf dem Kopfe stehen und liest x auf der Skala I des Stabes und ξ auf der Skala I der Zunge (jetzt unten) ab, so bringt der Indexstrich des Läufers Zahlen x und ξ zur Koinzidenz, für die die Gleichung 3a) gilt:

Ablesung IV

$$1.\log (x) + 1.\log \xi = 1.\log x_0 + 1.\log \xi_0$$

d. h. $x.\xi = x_0.\xi_0$, die also ein konstantes Produkt haben.

3'. Auf den Skalen I des Stabes und II der Zunge (die jetzt nebeneinander liegen) stehen sich Zahlen x und ξ gegenüber, für die die Gleichung 3a gilt:

Ablesung V

$$1.\log x + 2.1.\log \xi = 1.\log x_0 + 2.1.\log \xi_0$$

d. h. $x.\xi^2 = x_0.\xi^2_0$.

Dies wird z. B. benutzt, um die dritte Wurzel aus einer Zahl a zu ziehen:

Man macht $\xi_0 = 1$; $x_0 = a$ und sucht die Stelle wo $x = \xi$ ist.

Die letzten beiden Ablesungen IV und V lassen sich zweckmäßig verwenden zur Auflösung quadratischer und kubischer Gleichungen.

Ist die quadratische Gleichung

$$x^2 - a.x + b = 0$$

gegeben und sind x_1 und x_2 die Wurzeln, so ist bekanntlich: $x_1 + x_2 = a$ und $x_1 . x_2 = b$.

Man benutzt die Ablesung IV, mache $\xi_0 = 1$; $x_0 = b$ und suche (vermittels des Läufers) die Stelle wo $\xi + x = a$ ist, dann sind x und ξ die beiden Wurzeln x_1 und x_2.

Die kubische Gleichung habe die Form:

$$x^3 + a.x = b.$$

Wir schreiben sie so: $\frac{b}{x} - x^2 = a$.

Die umgekehrte Zunge (wie bei Ablesung IV und V) schieben wir so weit in den Stab, daß der End- oder Anfangsstrich der Zungenskala I über die auf der Skala II des Stabes abzulesende Zahl b zu stehen kommt.

Auf der Skala II der Zunge (jetzt oben) und der Skala II des Stabes stehen sich jetzt Zahlen gegenüber (Ables. IV), deren Produkt b ist.

Nennen wir x die auf der Zungenskala II abgelesene Zahl, so ist b/x die zugehörige Zahl auf der Stabskala II.

Andererseits steht der Zahl x auf der Zungenskala I eine Zahl x^2 gegenüber (Ablesung I). Somit stehen sich auf der Stabskala II und der Zungenskala I (die jetzt nebeneinanderliegen) die Werte x^2 und b/x gegenüber. Darunter sind solche zu suchen, deren Differenz a ist, dann ist x eine Wurzel der kubischen Gleichung.

Was die Stellung des Kommas beim Gebrauch des Rechenschiebers angeht, so ist es am besten, eine rohe Ueberschlagsrechnung im Kopfe auszuführen und damit die Stellung des Kommas im Endresultat zu ermitteln. Hierbei ist es zweckmäßig, nur mit ein- oder zweistelligen Zahlen zu rechnen und die Potenzen von 10 herauszuziehen (beim Quadrat- und Kubikwurzelziehen müssen die Exponenten von 10 durch 2 bezw. 3 teilbar sein!).

Die Rückseite der Zunge trägt drei Skalen:

Wir stecken die Zunge so in den Stab, daß diese Skalen oben liegen und die Ziffern aufrecht stehen.

1. Die obere Skala, mit S bezeichnet, stellt die Funktion log sin ξ mit der Längeneinheit von 1 mm dar. Die Ziffern dieser Skala geben die Werte von ξ in Graden und Minuten an.

Bei Benutzung der Sinus- und Tangens-Skalen ist es zweckmäßig, sich die Stabskalen I und II als solche Abschnitte der unendlich langen logarithmischen Skalen zu denken, daß die Endpunkte auf dem rechten Ende der Stabskalen die Nullpunkte darstellen.

Die Zahlen der Stabskalen bedeuten dann echte Brüche (deren Logarithmen ja negativ sind). Ebenso sind die rechten Endpunkte der S- und T-Skala der Zunge deren Nullpunkte.

Bei irgendeiner Stellung der Zunge stehen sich auf der oberen Stabskala I Zahlen x und auf der Zungenskala S Winkel ξ gegenüber, für die gilt:

Ablesung VI.

$$1.\log x - 1.\log\sin \xi = 1.\log x_0 - 1.\log \sin \xi_0$$

d. h. $$x = \left(\frac{x_0}{\sin \xi_0}\right) . \sin \xi$$

oder auch $x = x_1 . \sin \xi$ wenn x_1 die über einem Endstrich der S-Skala stehende Zahl ist.

Unten auf der Zunge liegt eine mit T bezeichnete Skala:

$$2.1.\log \tan \xi$$

wobei ξ auch in Graden abgelesen wird.

Ist x eine auf der unteren Stabskala abgelesene Zahl, so gilt:

Ablesung VII

$$2.1.\log x = 2.1.\log \tan \xi$$
$$= 2.1.\log x_0 - 2.1.\log \tan \xi_0$$

d. h. $$x = \left(\frac{x_0}{\tan \xi_0}\right) . \tan \xi$$

oder auch $x = x_1 . \tan \xi$

Nach Analogie mit früheren wird man bei dieser Stellung der Zunge ohne Mühe finden:

Ablesung VIII

$$x^2 = \left(\frac{x_0^2}{\sin \xi_0}\right) . \sin \xi = x_1^2 . \sin \xi$$

Ablesung IX

$$x^2 = \left(\frac{x_0^2}{\tan \xi_0}\right) . \tan \xi = x_1^2 . \tan \xi$$

Und bei umgekehrter Zunge (S-Skala unten, T-Skala oben, Zahlen der Zunge auf dem Kopf)

Ablesung X

$$x . \sin \xi = x_0 . \sin \xi_0 = x_1$$

Ablesung XI

$$x . \tan \xi = x_0 . \tan \xi_0 = x_1$$

Ablesung XII

$$x^2 . \sin \xi = x_0^2 . \sin \xi_0 = x_1^2$$

Ablesung XIII

$$x^2 . \tan \xi = x_0^2 . \tan \xi_0 = x_1^2$$

Bei den meisten Rechenschiebern trägt die Zunge zwischen der S- und T-Skala noch eine gleichmäßig geteilte Skala: 2.1.ξ.

Schiebt man bei der zuletzt benutzten Lage der Zunge, diese ganz in den Stab hinein, so daß sich die Endstriche der Stabskalen und Zungenskalen decken, so stehen sich auf der mittleren Zungenskala Zahlen ξ und der unteren Stabskala Zahlen x gegenüber mit der Beziehung:

Ablesung XIV

$$2.1.\log x = 2.1.\xi$$

d. h. $\xi = \log x$

Hierbei dient der Rechenschieber als Logarithmentafel.

Auf den S- und T-Skalen der Zunge stehen sich Winkel ξ und ξ' gegenüber, die der Gleichung genügen.

Ablesung XV

$$\sin \xi' = \tan^2 \xi$$

Um bei der Normal-Lage der Zunge (Zungenskalen I und II oben und aufrecht), die Werte von $\sin \xi$, $\tan \xi$, und $\log x$ ohne Herausziehen der Zunge finden zu können, sind auf der Unterseite des Stabes in kleinen Aussparungen Indexstriche angebracht. Ihre Benutzung wird man aus dem Obenstehenden sofort entnehmen können.

Die Genauigkeit der Rechenschieber in den gebräuchlichen Dimensionen kann auf 0,3% veranschlagt werden.

Auch Rechnungen höherer Genauigkeit lassen sich meistens so anordnen, das eine, eventuell wiederholte, Anwendung des Rechenschiebers ausreicht (gleichzeitige Benutzung von Multiplikations-Tafeln usw.).

Beim logarithmischen Rechenschieber liegt eine kreisförmige Anordnung der Skalen nahe, die zur Konstruktion von taschenuhrförmigen sogenannten Rechenuhren geführt hat.

Rechenschieber mit anderen Skalen sind vielfach in Gebrauch, ihre Benutzung wird sich aus der allgemeinen Theorie (Abschnitt 2a) ableiten lassen (z. B. gibt es Rechenschieber für den Sinus-Satz der sphärischen Trigonometrie u. dgl.).

3. Andere Rechenhilfsmittel. Eine Stelle mehr als der Rechenschieber gibt die vierstellige Logarithmentafel. Es gibt handliche Ausführungen (z. B. Logarithmen und Antilogarithmen von G. Koester-Heidelberg) die jedes Umblättern vermeiden.

Multiplikations-(usw.)Tafeln werden fast stets durch die Benutzung der Rechenmaschine entbehrlich gemacht, die eine erhebliche Zeitersparnis gewährt.

Zur Auflösung spezieller Gleichungen sind eine Menge von Apparaten konstruiert worden, ohne daß einer große Verbreitung gefunden hätte, da graphische und numerische Methoden dasselbe und mehr leisten. Insbesondere gibt es für Gleichungen 3. und 4. Grades übersichtliche Nomogramme, die bei gegebenen Koeffizienten sofort die Wurzeln abzulesen gestatten.

Literatur: **Galle**, *Die mathematischen Instrumente. Leipzig 1912.* — **L. Jakob**, *Le calcul mécanique. Encyclopédie scientifique. Paris 1911.* — **L. v. Schrutka**, *Theorie und Praxis des logarithmischen Rechenschiebers. Wien 1911.*

H. v. Sanden.

Redi

Francesco.

Geboren am 18. Februar 1626 in Arezzo, gestorben am 1. März 1698 in Pisa. Er studierte in Pisa, wo er zum Doktor der Philosophie und Medizin promovierte. Redi war einer der vielseitigsten Gelehrten seiner Zeit und zeichnete sich sowohl als Dichter wie auch als Naturforscher aus. Seine Verdienste wurden auch äußerlich dadurch anerkannt, daß der Großherzog Ferdinand II von Toskana ihn zu seinem Leibarzt machte und die Academia del Cimento ihn zu ihrem Mitglied erwählte. Als Naturforscher hat er namentlich die Kenntnis der Anatomie, Fortpflanzung und Metamorphose der Insekten bereichert. Auch über die Eingeweidewürmer und den Sitz und die Wirkung des Schlangengiftes hat er wertvolle Abhandlungen geliefert. Er wies zum ersten Male nach, daß in faulenden Flüssigkeiten sich weder Maden noch Würmer entwickeln können, wenn man die Fliegen und Würmer davon abhält, ihre Eier in das Wasser abzulegen. Auch eine Reihe von wichtigen medizinischen Abhandlungen hat er geschrieben. Von seinen Werken seien genannt: „Osservazioni intorno alla vipera" (Florenz 1664), „Esperienze intorno alla generazione degli insetti" (ibid. 1668), „Osservazioni intorno agli animali viventi che si trovano negli animali viventi" (ibid. 1684), „Esperienze intorno alle diverse cose naturali, e particolarmente à quelle che ci son portate dell' India" (ibid. 1671). „Consulti medici" (ibid. 1726 bis 1729 und 1863).

Literatur. *Biographie universelle, Bd. 37, 1824.* — *Nekrolog von* **Salvani** *in der vollständigen Ausgabe seiner Werke, Venedig 1712.* — **Fabroni**, *Nekrolog in Vitae illustrium Italorum, Bd. III.* — **Burckhardt**, *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Reduktion

ist bei den Tieren die Zurückbildung des ganzen Körpers oder seiner einzelnen Teile in einfachere Zustände; als Reduktionsteilungen bezeichnet man die letzten mit einer Vereinfachung des Chromatins verbundenen Teilungen der Geschlechtszellen (vgl. die Artikel „Befruchtung" und „Regeneration").

Reduktion.

1. Begriff. 2. Reduktion der Metalloxyde: a) Abspaltung von Sauerstoff. b) Affinität der Metalle zum Sauerstoff. c) Reduktionsvermögen der Reduktionsmittel. d) Verfahren von H. Goldschmidt. e) Reduktion des Eisenoxyds. Hochofengleichgewicht. f) Reduktion im elektrischen Ofen. 3. Reduktion der Metallsalzlösungen. Spannungsreihe der Metalle. 4. Reduktionspotential. 5. Reduktionsgeschwindigkeit. 6. Reduktion mit Wasserstoff. a) Reduktion bei Gegenwart von Platin oder Palladium. b) Verfahren von Sabatier und Senderens. c) Wirkungsweise der Metalle. d) Wasserstoff in statu nascendi. 7. Elektrolytische Reduktion. 8. Wirkung des Lichtes auf Reduktionsprozesse.

1. Begriff. Unter Reduktion (lateinisch, = Zurückführung) im engeren Sinne versteht man in der Chemie einen Vorgang, durch welchen eine durch Oxydation gebildete sauerstoffhaltige Verbindung auf ihren ursprünglichen Zustand zurückgeführt wird. Das geschieht im allgemeinen durch Anwendung von Stoffen, sogenannten Reduktionsmitteln, welche vermöge ihrer größeren Verwandtschaft zum Sauerstoff denselben dem zu reduzierenden Körper entziehen und dadurch selbst eine Oxydation erleiden. Das Schema eines Reduktionsvorganges wäre hiernach $MO + R \rightarrow M + RO$, wo MO die reduzierbare Verbindung, R das Reduktionsmittel und M das Reduktionsprodukt bedeutet.

Da ein Reduktionsprozeß sonach zwangsläufig mit einem Oxydationsvorgange verknüpft ist und von demselben nicht getrennt werden kann, müßte man, streng genommen, den Gesamtvorgang als Oxydations-Reduktionsprozeß bezeichnen. Man pflegt jedoch denselben nach dem Teile zu benennen, welchen man in dem gegebenen Falle als den wichtigeren erachtet. So wird z. B. die Gewinnung des Kupfers aus Kupferoxyd durch Kohle nach der Gleichung $CuO + C \rightarrow Cu + CO$ als Reduktion bezeichnet, weil die mit der Kupfererzeugung verknüpfte Oxydation der Kohle als nebensächlich aufgefaßt wird. Will man hingegen etwa Aldehyd durch Einwirkung von Chromat auf Alkohol darstellen, so spricht man von einer Oxydation, da die gleichzeitig damit stattfindende Reduktion des Chromates zu Chromisalz in diesem Falle in den Hintergrund des Interesses tritt.

Vom elektrochemischen Standpunkt aus (vgl. den Artikel „Oxydation", Bd. VI, S. 392) wird ein Reduktionsvorgang durch die Vermehrung negativer oder Verminderung positiver Ladungen gekennzeichnet. Ein Beispiel der ersten Art ist der Uebergang von elementarem Jod in den Ionenzustand, ein Beispiel der zweiten Art die Verwandlung von Kupferionen in metallisches Kupfer oder von dreiwertigem Eisen in zweiwertiges nach der Gleichung $Fe^{\cdots} - \oplus \rightarrow Fe^{\cdot\cdot}$.

In weiterem Sinne rechnet man zu den Reduktionsvorgängen alle chemischen Prozesse, durch welche bei sauerstoff-, schwefel- oder halogenhaltigen Verbindungen der Sauerstoff, Schwefel oder das Halogen ganz oder zum Teil von den anderen Bestandteilen der Verbindung getrennt oder durch Wasserstoff ersetzt wird. Die Reduktion der Sauerstoffverbindungen, insbesondere die unvollständige, wird auch Desoxydation genannt. Auch die Anlagerung von Wasserstoff (Hydrierung), wie etwa die Verwandlung der Oelsäure in Stearinsäure rechnet man zu den Reduktionsvorgängen.

2. Reduktion der Metalloxyde. Eine in theoretischer und praktischer Beziehung sehr interessante und wichtige Gruppe von Reduktionsprozessen bildet die Reduktion der Metalloxyde, welche bekanntlich zur Gewinnung der Metalle aus ihren Erzen führt.

2a) Abspaltung von Sauerstoff. Die Oxyde der Edelmetalle zerfallen schon bei gelindem Erhitzen in Metall und Sauerstoff. Quecksilberoxyd wird, wie schon Pristley und Lavoisier Ende des 18. Jahrhunderts nachgewiesen haben, durch schwaches Glühen in metallisches Quecksilber und Sauerstoff zerlegt, während bei einer Temperatur von 300 bis 400° C Quecksilber an der Luft oxydiert wird.

Auf einem von Nernst angegebenen Wege kann man aus thermischen Daten die Temperatur berechnen, oberhalb welcher ein Oxyd an der Luft, d. h. bei einem Partialdruck des Sauerstoffs von ca. $^1/_5$ Atmosphäre, Sauerstoff abspaltet. In folgender Tabelle sind die Temperaturen in Celsiusgraden angegeben, bei welcher sich Metalloxyde mit dem atmosphärischen Sauerstoffe im Gleichgewichte befinden:

Reaktion	Temperatur
$2Ag_2O \rightarrow 2Ag_2 + O_2$	110
$4CuO \rightarrow 2Cu_2O + O_2$	1406
$2CuO \rightarrow Cu_2 + O_2$	1503
$2Cu_2O \rightarrow 2Cu_2 + O_2$	1660
$2PbO \rightarrow Pb_2 + O_2$	2075
$2NiO \rightarrow Ni_2 + O_2$	2378
$2ZnO \rightarrow Zn_2 + O_2$	2534

Oberhalb der angeführten Temperatur tritt eine Zersetzung des Oxydes in dem von der Gleichung angegebenen Sinne ein, unterhalb derselben werden dagegen die Metalle bezw. deren niedere Oxyde durch den Luftsauerstoff oxydiert.

2b) Affinität der Metalle zum Sauerstoff. Je unedler das Metall ist, d. h. je größer seine Verwandtschaft zum Sauerstoffe ist, desto schwerer ist es aus seinem Oxyde abzuscheiden. Um dies zu erreichen, muß mindestens die Energiemenge, sei es in Form von Wärme, Elektrizität oder, bei Anwendung von Reduktionsmitteln, in Form von chemischer Energie aufgewendet werden, welche frei wird, wenn sich dasselbe mit Sauerstoff zum Oxyd vereinigt. Ueber die freie Energie, welche bei der Bildung der Metalloxyde entwickelt wird, ist zurzeit nur wenig bekannt, man kann dieselbe jedoch in erster Annäherung den Bildungswärmen der Oxyde gleichsetzen.[1]) In der folgenden Tabelle sind die von Berthelot und von Thomsen teils direkt auf kalorimetrischem Wege, teils durch Rechnung ermittelten Bildungswärmen der wichtigsten Oxyde bei gewöhnlicher Temperatur gegeben. Die Zahlen bedeuten die Wärmemengen in großen Kalorien[2]) ausgedrückt, welche bei der Vereinigung der Metalle mit einem Grammatom, d. h. mit 16 g Sauerstoff frei werden:

$K_2 + O$	97
$K_2 + O + H_2O$	129
$Na_2 + O + H_2O$	135
$Ca + O$	132
$Mg + O + H_2O$	149
$Al_2 + O_3$	127
$Si + O_2$	107
$Zn + O$	85
$Fe_3 + O_4$	67
$Ni_2 + O_3 + 3H_2O$	40
$Pb + O$	50
$Cu + O$	37
$Hg + O$	30
$Ag_2 + O$	6
$Au_2 + O_3 + 3H_2O$	4

Die wichtigsten Reduktionsmittel, Kohle, Kohlenoxyd und Wasserstoff entwickeln bei ihrer Vereinigung mit 16 g Sauerstoff folgende Wärmemengen:

$H_2 + O$	58
$C + O_2$	48
$C + O$	29
$CO + O$	68

2c) Reduktionsvermögen der Reduktionsmittel. Die angeführten Werte können zur allgemeinen Orientierung über das Verhalten der Metalloxyde den Reduktionsmitteln gegenüber und über das Reduktionsvermögen der letzteren bei Temperaturen bis zu ca. 1000° C benutzt werden. Bei höheren Temperaturen werden die Aenderungen der Bildungswärmen der Oxyde sowie der freien Energien der Reaktionen mit der Temperatur, die unterhalb 1000° relativ gering sind, sehr erheblich.

Aus den angeführten Zahlen ist zu ersehen, daß Kohle (bei Luftabschluß) nur die leichtest reduzierbaren Verbindungen, wie Silber-, Blei- und Kupferoxyd, zu reduzieren vermag. Kohlenoxyd und Wasserstoff haben eine größere reduzierende Kraft und sind noch imstande, Metalle wie Eisen und bei Temperaturen oberhalb 1000° auch Zink, aus ihren Oxyden abzuscheiden. Zur Reduktion der Oxyde des Aluminiums, Magnesiums, Siliciums und der Alkalimetalle reicht ihre reduzierende Kraft nicht mehr aus, vielmehr reduzieren diese Metalle vermöge ihrer enormen Affinität zu Sauerstoff, Wasser und Kohlensäure. So zersetzt z. B. Aluminium Wasserdampf unter Bildung von Wasserstoffgas, Magnesium brennt in einer Atmosphäre von Kohlensäure fort, wobei letztere zu Kohle reduziert wird.

2d) Verfahren von H. Goldschmidt. Auf der großen Oxydationswärme des Aluminiums beruht ein von Goldschmidt angegebenes Verfahren zur Darstellung von Metallen. Ein Gemisch von Aluminiumpulver mit Eisenoxyd, Chromoxyd oder Manganoxyd wird mittels einer zu diesem Zwecke speziell hergestellten Zündkapsel, indem man letztere anzündet, zur Reaktion gebracht. Da keine gasförmigen, die Wärme fortführenden Verbrennungsprodukte entstehen, wie bei der Kohle, steigt die Temperatur auf hellste Weißglut. Nicht nur das durch Reduktion erzeugte Metall schmilzt zu einem Regulus zusammen, sondern auch das gebildete Aluminiumoxyd wird bei der außerordentlich hohen Temperatur zu einer leichtflüssigen auf dem Metall schwimmenden Schlacke geschmolzen, durch welche das Metall vor der Berührung mit dem Luftsauerstoff geschützt wird. Man erhält leicht auf diese Weise in Tiegeln aus Magnesia große Mengen von reinem kohlefreiem Eisen, Chrom oder Mangan. — Dieselbe Reaktion wird zur Erzeugung hoher Temperaturen, zum Nieten, Hartlöten und zum Schweißen, insbesondere von

[1]) Die Bildungswärme ist ein Maß für die bei der Vereinigung der Metalle mit Sauerstoff entbundene Gesamtenergie, welche nach einem von Helmholz aufgestellten Grundsatz der Thermodynamik gleich der Summe der freien und der gebundenen Energie (latente Wärme) des Vorganges ist.

[2]) d. h. jene Wärmemenge, welche erforderlich ist, um die Temperatur von 1 kg Wasser um 1° C zu erhöhen.

Straßenbahnschienen und dergleichen benutzt. Zu diesem Zwecke werden die zu bearbeitenden Eisenteile mit einer aus Eisenoxyd, Aluminiumpulver und Sand bestehenden Masse umgeben. Zündet man die Masse an, so brennt sie von selbst weiter und erhitzt dabei die zu schweißenden Teile auf Weißglut („Aluminothermie").

2e) Reduktion des Eisenoxyds. Hochofengleichgewicht. Von besonderem Interesse ist die Reduktion der Oxyde des Eisens, da dieser Vorgang bekanntlich im Hochofen zur Erzeugung des metallischen Eisens führt. Wie schon erwähnt, wird Eisenoxyd durch Kohlenoxyd und durch Wasserdampf bei Glühhitze reduziert. Andererseits vermag metallisches Eisen bei der gleichen Temperatur analog dem Aluminium oder den Alkalimetallen Wasser unter Abscheidung von Wasserstoff zu zersetzen, sowie Kohlensäure zu Kohlenoxyd zu reduzieren. Wir haben es also mit zwei umkehrbaren Vorgängen zu tun, welche sich durch die Gleichungen:

$$(1)\ Fe_3O_4 + 4H_2 \rightleftarrows 3Fe + 4H_2O$$
$$(2)\ Fe_3O_4 + 4CO \rightleftarrows 3Fe + 4CO_2$$

ausdrücken lassen.

Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, dessen Lage von der Temperatur, aber nicht vom Drucke abhängig ist, da die Reaktion ohne Volumänderung erfolgt. Erhitzen wir beispielsweise in einem geschlossenen Rohre Wasserstoff mit überschüssigem Eisenoxyduloxyd auf 770° C, so bleibt nach Versuchen von Deville die Reaktion stehen, sobald 35% des angewandten Wasserstoffes unter Bildung von metallischem Eisen und Wasserdampf zur Reduktion verbraucht worden sind, die Gasphase also aus 65% Wasserstoff und 35% Wasserdampf zusammengesetzt ist. Die gleiche Gaszusammensetzung erhält man, wenn man überschüssiges Eisen mit Wasserdampf auf die gleiche Temperatur erhitzt. Hierbei kommt sonach die Reaktion zum Stillstand, wenn 65% des angewandten Wasserdampfes unter Bildung der äquivalenten Menge Eisenoxyd und Wasserstoff verschwunden sind.

Bei Erhöhung der Temperatur verschiebt sich das Gleichgewicht der Reaktion (1) von links nach rechts, wie aus folgender, nach Versuchen von Deville und von Preuner zusammengestellten Tabelle zu ersehen ist.

(siehe Tabelle 1 auf der nächsten Spalte).

Die Reaktion zwischen Eisen und Wasserdampf wird in der Technik dazu benutzt, um Wasserstoff darzustellen.

Analog liegen die Verhältnisse bei der Reduktion des Eisenoxyds durch Kohlenoxyd nach Gleichung (2). In Tabelle 2 sind die auf thermodynamischem Wege berechneten Werte für das Gleichgewicht der Reaktion (2), welche

Tabelle 1.

Temperatur in °C	Gaszusammensetzung	
	% H_2	% H_2O
200	95,3	4,7
265	93,6	6,4
360	89,4	10,6
440	85,1	14,9
770	64,9	35,1
900	59,2	40,8
1025	56,2	43,8
1150	53,8	46,2

mit den experimentellen Ergebnissen von Baur und Gläßner und von Schenck gut übereinstimmen, gegeben:

Tabelle 2.

Temperatur in °C	Gaszusammensetzung	
	% CO	% CO_2
327	38,6	61,4
527	52	48
727	61,5	38,5
927	68	32
1127	73	27
1327	77	23
1527	80	20

Aus dem Gesagten wird verständlich, daß das im Hochofen als Reduktionsmittel wirkende, durch Einblasen von Luft (Wind) durch Schichten von glühender Kohle erzeugte Kohlenoxyd nie völlig zur Reduktion der Eisenoxyde verbraucht wird, sondern sich in reichlichen Mengen in den Gichtgasen vorfindet. Als mittlere Zusammensetzung der Gichtgase kann man 60% Stickstoff, 26% Kohlenoxyd und 13% Kohlensäure annehmen. Je heißer ein Ofen geht, desto größer ist der Kohlenoxydgehalt der Gichtgase. Man hat früher vergeblich versucht, das in den Gichtgasen entweichende Kohlenoxyd zu weiterer Reduktion von Eisenerzen zu verwenden, indem man die Hochöfen höher, bis zu 30 m baute. Wie wir nun wissen, ist das negative Resultat dieser kostspieligen Versuche dadurch bedingt, daß die Reaktion (2) umkehrbar ist, also nur ein bestimmter, von der Temperatur abhängiger Bruchteil des Kohlenoxyds zur Reduktion verbraucht werden kann (siehe auch die Artikel „Chemisches Gleichgewicht" und „Metalle".

2f) Reduktion im elektrischen Ofen. Mit Erhöhung der Temperatur wird die Affinität der Metalle zu Sauerstoff stark, die der Kohle zu letzterem nur in geringerem Maße vermindert. Daher ist es möglich, bei sehr hohen Temperaturen, wie sie etwa durch Anwendung eines elektrischen Ofens zu erreichen sind, Aluminiumoxyd, Siliciumoxyd und die Oxyde oder Karbonate der Alkalimetalle durch Kohle zu reduzieren.

3. Reduktion der Metallsalzlösungen. Auch aus den wässerigen Lösungen lassen sich Metalle abscheiden. Taucht man beispielsweise in eine Kupfersulfatlösung einen Zinkstab, so geht Zink in Lösung, während sich metallisches Kupfer in Form eines schwarzen Pulvers ausscheidet. Der gleiche Vorgang vollzieht sich in dem bekannten Daniellelement, in welchem der positive Pol aus Zink, der negative Pol aus einem Kupferblech besteht, welches in eine Lösung von Kupfersulfat taucht. Bei Stromschluß geht Zink in Lösung, während an der Kathode gleichzeitig die äquivalente Menge Kupfer gefällt wird. Vom elektrochemischen Standpunkte aus ist der Vorgang darauf zurückzuführen, daß das Zink ein größeres Bestreben hat, in den Ionenzustand überzugehen als das Kupfer.

Spannungsreihe der Metalle. Das Bestreben eines Metalles in den Ionenzustand überzugehen, sein elektrolytischer Lösungsdruck, wird durch das Potential, welches dasselbe in der normalen wässerigen Lösung eines seiner Salze annimmt, gemessen. Je nach der Dissoziation des Salzes sind die Werte verschieden. Die Angaben der folgenden Tabelle beziehen sich mit Ausnahme des Silbers ($AgNO_3$) auf Sulfatlösungen, wobei das Potential einer Wasserstoffelektrode, d. h. eines in verdünnte Schwefelsäure tauchenden und von Wasserstoffgas von Atmosphärendruck umspülten Platinblechs gleich Null gesetzt ist (s. auch den Artikel „Potential").

Tabelle 3.

Mg	—1,508	H_2	±0,0
Zn	—0,801	Cu	+0,308
Fe	—0,66	Hg	+0,72
Ni	—0,60	Ag	+0,771

Je größer der Lösungsdruck des Metalles ist, desto negativer ist sein Potential.

Jedes von den in der Reihe angeführten Metallen kann die nachfolgenden Metalle zufolge seines größeren Lösungsdruckes aus der wässerigen Lösung ihrer Salze abscheiden, während es hierbei selbst in den Ionenzustand übergeht. Umgekehrt wird es aus seinen Salzen von den vorangehenden Metallen gefällt. Als Beispiel sei angeführt, daß alle Metalle, die in der Spannungsreihe über dem Wasserstoffe stehen, Säuren unter Wasserstoffentwickelung zersetzen, also denselben aus seinem Ionenzustand verdrängen. Umgekehrt vermag gasförmiger Wasserstoff die Metalle mit geringerem elektrolytischem Lösungsdruck, wie Kupfer, Quecksilber, und die Edelmetalle, aus den wässerigen Lösungen ihrer Salze abzuscheiden (vgl. weiter unten den Absatz 6a).

4. Reduktionspotential. Wie die Metalle, haben auch die ionisierten Reduktionsmittel, wie die Ferro-, Cupro- und Stannosalze das Bestreben, positive Ladungen aufzunehmen und damit in eine höhere Wertigkeitsstufe überzugehen. Taucht man in die wässerige Lösung eines Reduktionsmittels ein Platinblech, so nimmt dasselbe ein Potential an, welches um so negativer ist, je größer die Tendenz des Reduktionsmittels zur Aufnahme einer positiven Ladung oder, mit anderen Worten, zum Uebergang in eine höhere Wertigkeitsstufe ist. Das Potential eines Reduktionsmittels, sein Reduktionspotential, ist also ein Maß der reduzierenden Kraft desselben. Die Reduktionspotentiale der gebräuchlichsten Reduktionsmittels sind, nach Messungen von Bancroft, Fredenhagen und anderen, folgende:

$SnCl_2$ | KOH	— 0,55	$SnCl_2$ | HCl	+ 0,32
Chromoazetat	— 0,25	Cu_2Cl_2	+ 0,30
H_2 | H_2SO_4	± 0	$FeCl_2$	+ 0,67

Mit Hilfe der Reduktionspotentiale kann man leicht erkennen, ob eine Reduktion möglich ist. Ein Vergleich der Werte der Reduktionspotentiale mit denen der Metallpotentiale ergibt z. B., daß eine alkalische Zinnchlorürlösung selbst unedle Metalle, wie Cadmium, noch aus den Lösungen ihrer Salze fällen muß, was tatsächlich auch der Fall ist. Ferroverbindungen sind imstande, die Salze der Edelmetalle und des Silbers zu reduzieren, während ihre Reduktionsfähigkeit zur Abscheidung von Kupfer nicht mehr ausreichend ist.

5. Reduktionsgeschwindigkeit. Außer dem Reduktionsvermögen des Reduktionsmittels ist für den Verlauf und den Erfolg der Reduktion die Geschwindigkeit des Vorganges von entscheidender Bedeutung. Die Geschwindigkeit eines chemischen Prozesses steht mit der Energie, welche bei demselben frei wird, in keinem Zusammenhange. Analog den Verhältnissen bei den Oxydationsvorgängen (vgl. den Artikel „Oxydation", Bd. VI, S. 397) erreicht man zuweilen mit schwächeren Reduktionsmitteln stärkere Wirkungen, als bei Anwendung von energischeren Reduktionsmitteln. So erhält man beispielsweise bei der Reduktion von Nitrobenzol in alkalischer Lösung mit Kupferpulver Anilin, während bei Anwendung von Zink, dessen Reduktionsvermögen viel größer ist, die Reduktion beim Hydrazobenzol, einem Zwischenprodukte der Reduktion, stehen bleibt.

6. Reduktion mit Wasserstoff. Gasförmiger Wasserstoff übt trotz seines großen Reduktionsvermögens bei gewöhnlicher Temperatur nur geringe reduzierende Wirkungen aus. Die Oxyde der Metalle oder die wässerigen Lösungen ihrer Salze werden unterhalb 100° C nicht oder nur äußerst langsam von Wasserstoffgas angegriffen.

Die Geschwindigkeit eines Reduktions-

vorganges kann, wie die eines jeden chemischen Vorganges, durch Erhöhung der Temperatur um das Vielfache gesteigert werden (vgl. den Artikel „Oxydation", Bd. VI, S. 393).

6a) Reduktion bei Gegenwart von Platin oder Palladium. Ein anderes Mittel, um den Verlauf einer Reduktion mit Wasserstoff zu beschleunigen, haben wir in der Anwendung von Katalysatoren. Als solche sind insbesondere fein verteilte Metalle wirksam. Bei Gegenwart von platiniertem Platin- oder Palladiummohr werden nach Versuchen von Neumann alle Metalle, die einen geringeren Lösungsdruck haben als Wasserstoff von Atmosphärendruck, wie Gold, Platin, Silber, Kupfer (vgl. Tabelle 3) von ersterem beim Durchleiten durch die wässerige Lösung ihrer Salze schon bei Zimmertemperatur abgeschieden. Wie Gladstone und Tribe und Paal nachgewiesen haben, kann man bei Anwesenheit von Platin- und Palladiumschwarz oder von kolloidalem Palladium durch Wasserstoff Chlorate in Chloride, Nitrate in Nitrite, Ferrisalze in Ferrosalze, Nitrobenzol in Anilin überführen. — Auch Gasreaktionen mit Wasserstoff werden durch fein verteilte Metalle ausgelöst oder beschleunigt. Stickoxyd oder Untersalpetersäure werden, wie Kuhlmann schon 1839 gezeigt hat, durch Wasserstoff bei gewöhnlicher Temperatur bei Anwesenheit von Platinschwarz sehr energisch zu Ammoniak reduziert, aus Blausäure entsteht Methylamin.

6b) Verfahren von Sabatier und Senderens. Bei höheren Temperaturen hat sich insbesondere Nickelschwamm als äußerst wirksamer Wasserstoffüberträger erwiesen und wird zur Ausführung der mannigfaltigsten Reduktionsprozesse, namentlich organischer Natur, benutzt. Nach Sabatier und Senderens leitet man zu diesem Zwecke ein Gemisch der reduzierbaren Substanz in Gas- oder Dampfform mit Wasserstoff über fein verteiltes Nickel bei Temperaturen von etwa 200 bis 400° C. Kohlenoxyd wird so in Methan, Benzol in Hexahydrobenzol, Aceton in Isopropylalkohol verwandelt. Die Reaktion ist, wie Zelinsky gezeigt hat, umkehrbar. Hexahydrobenzol wird beispielsweise bei Gegenwart von Palladium in Benzol und Wasserstoff gespalten. — In der Technik verwendet man die Reduktion mit Wasserstoff bei Gegenwart fein verteilter Metalle, um Oelsäure in die wirtschaftlich wertvollere Stearinsäure zu verwandeln.

6c) Wirkungsweise der Metalle. Die Erklärung für den die Wirkung des Wasserstoffs beschleunigenden Einfluß der Metalle wird teils in der Fähigkeit derselben Hydrüre zu bilden, teils darin zu suchen sein, daß Wasserstoff sich in den meisten Metallen löst, und zwar, wie aus Versuchen von Hoitsema hervorheht, in Form von Einzelatomen. In hohem Maße kommt diese Fähigkeit dem Platin und dem Palladium zu, und zwar absorbiert 1 Volumen des letzteren bis zu 300 Volumina Wasserstoff. Nach der Theorie der Zwischenreaktionen wird dann (vgl. den Artikel „Oxydation" S. 398) die beschleunigende Wirkung der Metalle auf die Reduktion mit Wasserstoff darauf zurückzuführen sein, daß der reduzierbare Stoff mit den Hydrüren bezw. Wasserstoffatomen rascher reagiert, als mit den Molekülen des Wasserstoffs.

6d) Wasserstoff in statu nascendi. Eine besonders erhöhte Wirksamkeit zeigt der Wasserstoff im Entstehungsmomente, in statu nascendi. In diesem Zustande bewirkt er Reduktionen, die der gasförmige Wasserstoff bei derselben Temperatur nicht zu bewirken vermag. Besonders wichtig ist die energische Wirkung des naszierenden Wasserstoffs für die organische Chemie; die ganze Anilinindustrie gründet sich hierauf. Um naszierenden Wasserstoff zu erhalten, läßt man Amalgame des Natriums, Magnesiums oder Aluminiums auf Wasser (Reduktion der Aldehyde und Ketone) oder Metalle wie Zink, Zinn, Eisen auf Säuren (Reduktion der Nitrokörper) bei Gegenwart der zu reduzierenden Substanz einwirken.

Der Verlauf des Vorgangs kann schematisch durch die Folgereaktion

a) $M + H_2SO_4 \rightarrow MSO_4 + 2H$
b) $RO + 2H \rightarrow R + H_2O$

ausgedrückt werden, wo M das den naszierenden Wasserstoff erzeugende Metall, RO die reduzierbare Verbindung, R das Reduktionsprodukt bedeutet. Als reduzierendes Agens sind vermutlich Einzelatome des Wasserstoffs oder Legierungen desselben mit dem zur Reduktion benutzten Metalle wirksam. Das erhöhte Reduktionsvermögen des naszierenden Wasserstoffs wird dann darauf zurückzuführen sein, daß bei der Verkoppelung der Vorgänge a und b zu einem untrennbaren Gesamtvorgange die für die Reduktion verfügbare freie Energie bedeutend größer ist, als wenn im Teilvorgang a bei der Erzeugung von gasförmigem Wasserstoff aus den Einzelatomen bereits ein erheblicher Bruchteil der Energie ohne Nutzen für die Reduktion verloren gegangen ist.

Der auf verschiedene Weise dargestellte naszierende Wasserstoff wirkt verschieden. So reduziert z. B. Natriumamalgam Chlorate oder Halogensilber nicht, während die Reduktion zu Chlorid bezw. zu Silber leicht eintritt, wenn man Zink und Säure anwendet.

7. **Elektrolytische Reduktion.** Ein bequemes Mittel, um Reduktionswirkungen auszuüben, bietet der elektrische Strom.

Zu diesem Zwecke fügt man die reduzierbare Verbindung zu einem zweckmäßig zu wählenden wässerigen Elektrolyten hinzu. Beim Durchgang des Stromes wird an der Kathode durch Entladung von Wasserstoffionen Wasserstoff entwickelt, der teilweise oder ganz zur Reduktion verbraucht wird. Da hierbei die Reduktion ohne Anwendung eines stofflichen Reduktionsmittels erfolgt, ist die Aufarbeitung und Reingewinnung des Endproduktes in vielen Fällen wesentlich einfacher als bei der rein chemischen Reduktion, worin ein wichtiger Vorzug der elektrolytischen Reduktion zu erblicken ist.

Der Verlauf und das Ergebnis der elektrolytischen Reduktion hängt in erster Linie von der zur Elektrolyse angewandten Stromdichte, der Zusammensetzung des Elektrolyten und insbesondere von der Wahl des Kathodenmaterials ab. So liefert z. B. eine alkalische wässerige Suspension von Nitrobenzol an Platin- oder Nickelkathoden glatt Azoxybenzol, während an Zink, Zinn oder Blei bei der gleichen Stromdichte und Zusammensetzung des Elektrolyten Hydrazobenzol, an Kupfer hingegen Anilin als Hauptprodukt gebildet wird. — Die Verschiedenheit in der Wirkung der verschiedenen Kathoden ist, wie die Untersuchungen von Haber, Förster und Tafel ergeben haben, teils auf katalytische Einflüsse des Kathodenmetalls (vgl. hierzu die Abschnitte **6a**, b, c dieses Artikels), teils auf die verschiedenen Werte des Potentials zurückzuführen, welches sich bei der Elektrolyse an den einzelnen Kathoden einstellt. Es hat sich nämlich gezeigt, daß der Wasserstoff zu seiner Abscheidung einer höheren Spannung bedarf, als man seinem Potential entsprechend erwarten sollte, und daß diese Ueberspannung an verschiedenen Kathoden verschieden ist. An Blei und Zink erreicht sie den Wert von nahezu einem Volt.

8. Wirkung des Lichtes auf Reduktionsprozesse. Auch durch Licht können Reduktionsprozesse hervorgerufen werden, und zwar lassen sich zwei Arten der Lichtwirkung unterscheiden. Das Licht kann einen freiwillig verlaufenden Prozeß beschleunigen, wie das beim Belichten der photographischen Platte der Fall ist. Hier erfolgt bekanntlich die Reduktion der Silbersalze durch die Gelatine, welche im Dunkeln sich nur langsam vollzieht (Ueberreifen, Schleiern der Platte), bei Einwirkung von Licht momentan, das Licht übt in diesem Falle also nur eine auslösende, eine katalytische Wirkung aus. Diese Art der Lichtwirkung bezeichnet man als Photokatalyse. — Eine wesentlich andere Rolle spielt das Licht bei einem anderen, äußerst wichtigen Reduktionsvorgange, der Assimilation der Kohlensäure in den grünen Teilen der Pflanzen. Dieser Vorgang, der eine Umkehrung der in den Lebewesen sich freiwillig unter Entwickelung von Energie abspielenden Oxydationsprozesse (vgl. den Artikel „Oxydation", S. 393) ist, kann sich nur bei dauernder Zufuhr von äußerer Energie vollziehen. In der Natur wird die zur Kohlensäureassimilation erforderliche Energie bekanntlich von der Sonne geliefert.

Literatur. **Ostwald**, *Grundlinien der anorganischen Chemie.* — **R. Schenck**, *Physikalische Chemie der Metalle. Halle 1909.* — **Förster**, *Elektrochemie wässeriger Lösungen. Leipzig 1905.* — **Sabatier und Senderens**, *Nouvelles méthodes generales d'hydrogénation. Annales de chim. et de phys. [8], T. 4, S. 319 bis 488 (1905).* — *Ueber elektrolytische Reduktion siehe* **A. Moser**, *Elektrolytische Prozesse der organischen Chemie. Halle 1910.*

A. Moser.

Reflexe.

1. Definition des Reflexes. Unter einem Reflex verstehen wir eine durch Vermittelung von Nervenzellen erfolgende Reizbeantwortung. Wenn wir uns in den Finger stechen, so fahren wir zurück, wenn wir einem hungrigen Hund Futter zeigen, so beginnt sein Speichel zu fließen. Diese Bewegung bezw. Speichelsekretion sind Reflexe. Bisher wurden vielfach noch zwei Eigenschaften als charakteristisch für einen Reflex angesehen, die Unabhängigkeit vom Willen und das Maschinenmäßige seines Ablaufes. Wir müssen jedoch auf Grund vieler Erfahrungen annehmen, daß die vom Willen abhängigen Innervationen den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgen wie die Reflexe, daß also kein prinzipieller Unterschied zwischen reflektorischer und willkürlicher Bewegung besteht. Auch von einem maschinenmäßigen Ablauf der Reflexe kann nicht die Rede sein; denn die eingehende Untersuchung ergibt in den meisten Fällen eine große Veränderlichkeit der Reflexe.

Für das Zustandekommen eines Reflexes ist eine nervöse Bahn notwendig, welche die durch den Reiz hervorgerufene Erregung zu den Nervenzellen hinleitet; diese Bahn wird auch als sensible, zentripetale oder afferente Bahn bezeichnet. Dann ist die Nervenzelle mit ihrem Fortsatz zu nennen, welche die Erregung zu den Erfolgsorganen, den Mus-

keln und Drüsen hinleitet. Die Ansammlung von Nervenzellen, welche die Erregung vermitteln, werden Ganglien oder Zentralnervensystem, die Nervenfortsätze motorische, zentrifugale oder efferente Nerven benannt. Zentripetale Bahn, Nervenzelle und zentrifugale Bahn bilden einen Reflexbogen.

Für die Aufnahme des Reizes haben sich im Laufe der Zeiten eine Reihe von Sinnesorganen entwickelt. Der einfachste Fall ist der, daß die sensiblen Nerven frei zwischen den Zellen der Haut enden, oder es sind Sinneszellen (Rezeptionszellen) in der Haut vorhanden, welche entwickelungsgeschichtlich mit den Nervenzellen verwandt sind und einen sensiblen Nerven zu den im Innern des Körpers gelegenen Nervenzellen senden, oder es sind Sinneszellen vorhanden, welche mit einem sensiblen Nerven in Verbindung stehen, dessen Nervenzelle jedoch nicht in der Peripherie des Körpers gelegen ist. Die Figur 1 kann über diese verschiedenen Formen der Sinnesorgane Aufschluß geben; auf diese Formen lassen sich sämtliche Sinnesorgane der Tierreihe zurückführen.

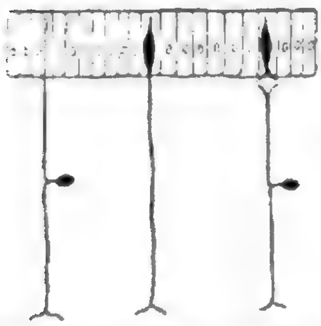


Fig. 1. Schematische Darstellung der verschiedenen Formen von Sinnesorganen, von denen sich alle Sinnesorgane ableiten lassen.

Nach Bethe besteht bei den Medusen der Reflexbogen bloß aus einer Nervenzelle, wie dies in Figur 2 schematisch wiedergegeben

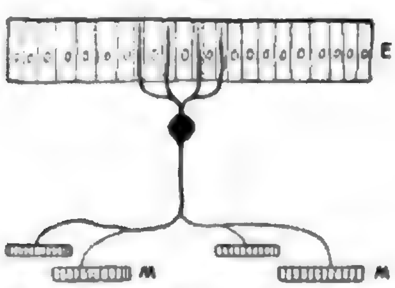


Fig. 2. Reflexbogen einer Meduse.

ist. Diese Nervenzelle hat die Aufgabe bei Reizung des Medusenkörpers an einer Stelle die gleichzeitige Kontraktion mehrerer Muskelzellen zu veranlassen. Der Vorteil, welchen die Einschaltung einer Nervenzelle gegenüber den gleichfalls bei den Medusen vorkommenden Epithelmuskelzellen (Fig. 3) bietet, ist ohne weiteres klar. Bei Reizung dieser Zellen verkürzt sich nur die kontraktile Substanz, welche sich an der Basis der Zelle ausgeschieden hat, während sich bei Reizung des Reflexbogens immer eine Reihe von Muskelzellen gleichzeitig verkürzen.

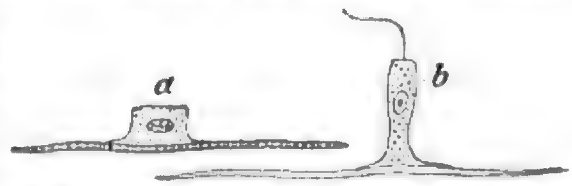


Fig. 3. Epithelmuskelzellen. Nach R. Hertwig. a von einer Meduse.

Eine kompliziertere Form von Reflexbogen findet sich gleichfalls bei den wirbellosen Tieren. Er besteht aus einer Sinneszelle, welche durch ihren sensiblen Nerven mit mehreren Nervenzellen verbunden ist, die ihrerseits durch ihren Nervenfortsatz mit einer größeren Anzahl von Muskel- oder Drüsenzellen in Verbindung stehen. Figur 4

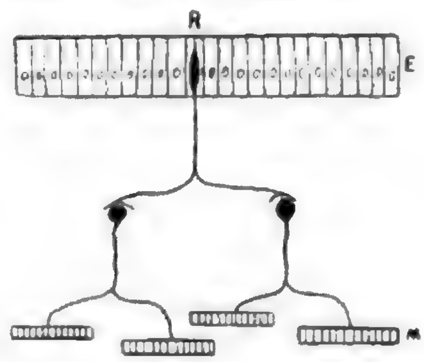


Fig. 4. Reflexbogen, welcher aus Rezeptionszelle und motorischer Nervenzelle besteht.

zeigt einen solchen Reflexbogen. Bei Reizung seiner Sinneszelle kommt es zur gleichzeitigen Kontraktion einer großen Anzahl von Muskelzellen. Derartige Reflexbögen finden sich z. B. im nervösen Bauchstrang der Würmer und Gliedertiere. Es sei jedoch besonders hervorgehoben, daß die Nervenzellen im Schema der Figuren 2 und 4, an Stelle vieler Hunderte, in gleichem Sinne wirkender Nervenzellen gesetzt sind.

Aber schon bei diesen einfachen Reflexbögen tritt uns ein für die Funktion des Nervensystems überaus wichtiger Faktor entgegen. Es verbinden sich die sensiblen Nerven mehrerer Sinneszellen mit einer motorischen Nervenzelle (siehe Fig. 5). Ein solches motorisches Neuron hat Sherrington als gemeinsame Strecke bezeichnet, in welcher sich die Interferenz der von verschiedenen Stellen des Körpers kommenden Erregungen abspielt. Die Interferenz in der gemeinsamen Strecke führt entweder zu einer Verstärkung der Erregung, d. i. Summation oder Bahnung, oder zu einer Abschwächung, zu einer Hemmung (siehe den Artikel „Nervensystem, Physiologie des Nervensystems“).

Sherrington beschreibt das Prinzip der gemeinsamen Strecke in folgender Weise: Am Anfange jedes Reflexbogens ist eine

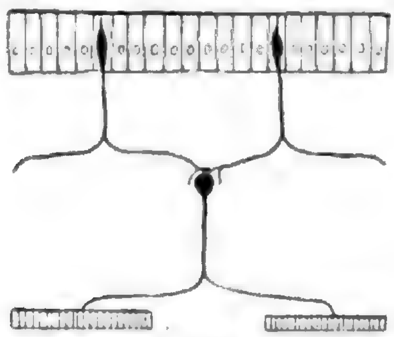


Fig. 5. Gemeinsame Innervation einer motorischen Nervenzelle von zwei Sinneszellen. Prinzip der gemeinsamen Strecke.

Rezeptionszelle, welche die reizaufnehmende Körperoberfläche mit dem Nervensystem verbindet. Die Rezeptionszelle und ihr Nerv stellen den einzigen Weg vor, auf welchem die Erregung ihrer Bestimmung zugeführt werden kann. Es ist eine Strecke des Reflexbogens, welche ganz allein von Erregungen durchlaufen wird, welche von der Rezeptionszelle kommen, eine andere Sinneszelle kann diese Strecke des Reflexbogens nicht benützen. Eine einzige Rezeptionszelle kann aber mit vielen motorischen Zellen verbunden sein und ihre Erregung wird alle diese Nervenzellen und ihrer Erfolgsorgane in Erregung

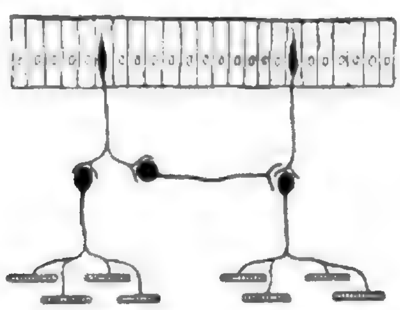


Fig. 6. Reflexbogen, bei welchem zwischen Sinneszelle und motorischer Nervenzelle eine sensible Nervenzelle eingeschaltet ist.

versetzen. Das motorische Neuron jedes Reflexbogens unterscheidet sich dadurch von dem ersten Glied des Reflexbogens, daß es nicht ausschließlich den Erregungen dient, welche von einer Rezeptionszelle kommen, sondern daß es Erregung von den verschiedensten Sinneszellen des Körpers erhalten kann. Während die Sinneszelle und ihr Nerv einen Privatweg vorstellt, welcher ausschließlich die von einer Stelle des Körpers kommenden Erregungen leitet, ist das motorische Neuron ein öffentlicher Weg für Erregungen, welche von der Oberfläche des ganzen Körpers ihren Ausgang nehmen können.

Die Bedeutung der gemeinsamen Strecke tritt um so mehr hervor, je mehr hintereinander geschaltete Neurone den Reflexbogen bilden. Es kann z. B. zwischen der Rezeptionszelle und dem motorischen Neuron noch eine weitere Nervenzelle eingeschaltet sein, welche der Koordination mehrerer motorischer Neurone dient. Ein solches Neuron ist in Figur 6 eingezeichnet; es wird wegen seiner nahen Beziehung zu den Sinneszellen auch als sensibles Neuron oder wegen seiner Funktion als Koordinationsneuron bezeichnet. Solche Reflexbögen finden wir bei zahlreichen wirbellosen Tieren z. B. bei den Schnecken, Würmern und Gliedertieren. In Figur 7 ist die

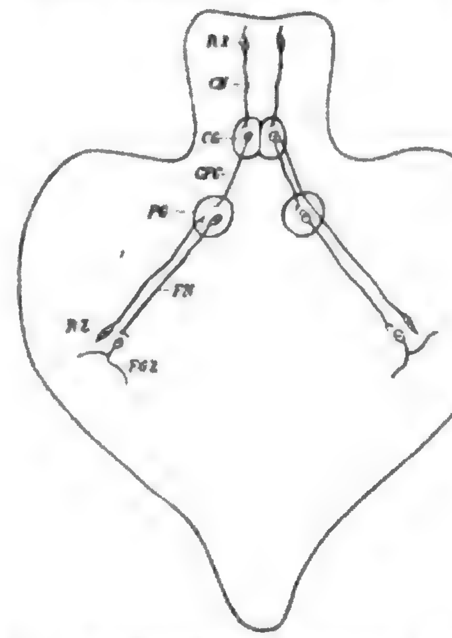


Fig. 7. Schematische Darstellung der Nervenzellen im Nervensystem von Aplysia limacina. Rz Rezeptionszelle, CN Cerebralnerv, CG Cerebralganglion, PG Pedalganglion, FN Flügelnerv, FGZ Flügelganglienzelle.

Anordnung der nervösen Elemente im Nervensystem von Aplysia limacina, einer Meeresschnecke, eingezeichnet. Die Rezeptionszellen stehen sowohl in Verbindung mit den Nervenzellen des Hirnganglions als auch jenen des Pedalganglions. Gerade diese Tiere zeigen, daß durch das Zusammenarbeiten von Gehirn und Pedalganglion viel mehr Reflexkombinationen vermittelt werden, als durch das vom Hirnganglion getrennte Pedalganglion allein.

Einen entsprechenden Reflexbogen finden wir auch im Rückenmark der Wirbeltiere. Figur 8. **Verworn** vertritt die Annahme, daß dies überhaupt der einfachste Reflexbogen höherstehender Wirbeltiere ist.

Im Nervensystem der Wirbeltiere gibt es viele Reflexbögen, welche aus einer noch größeren Anzahl hintereinander geschalteter Neurone bestehen. Es ist dabei sicher, daß die Nervenzellen dieser Reflexbögen funk-

tionelle Verschiedenheiten aufweisen, welche in einer verschieden hohen Erregbarkeit, einem verschieden starken Sauerstoffbe-

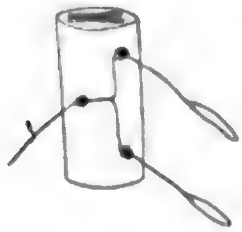


Fig. 8. Reflexbogen des Rückenmarkes.

dürfnis, einer verschieden schnellen Erregungsleitung und einer verschieden starken Ermüdbarkeit zum Ausdruck kommen, Verschiedenheiten, welche den Ablauf der Reflexe beherrschen.

Es ist ferner eine höchst wichtige Tatsache, daß sich die Nervenzellen funktionell von ihren Nervenfortsätzen unterscheiden.

Die Erregungsvorgänge in den Nervenzellen haben eine größere Intensität und verlaufen langsamer als im Nerven. Auf diese Verschiedenheiten lassen sich, wie zum Teil schon Bethe gezeigt hat, eine Reihe von Eigenschaften zurückführen, welche das Zentralnervensystem von den Nerven unterscheiden. Auf der geringen Reaktionsgeschwindigkeit des Zentralnervensystems beruht die leichte Ermüdbarkeit, mit welcher ihrerseits die Bahnungserscheinungen, die Hemmungen, die rhythmischen Reflexe zusammenhängen, auf der geringen Reaktionsgeschwindigkeit beruht die langsame Erregungsleitung des Zentralnervensystems, das Dekrement, d. h. die Intensitätsabnahme der Erregungswellen beim Durchlaufen des Zentralnervensystems, die besonders entwickelte Fähigkeit schwache Reizwirkungen zu starken Wirkungen zu summieren. Eine Reihe dieser Eigenschaften treten um so mehr hervor, je mehr Nervenzellen in den Reflexbogen eingeschaltet sind. Es nimmt durch die größere Anzahl von Nervenzellen das Ausbreitungsgebiet der Erregung zu, aber es müssen stärkere Reize verwendet werden, um den ausgebreiteten Reflex zu erhalten, d. h. das Dekrement der Erregung ist stärker; die Fähigkeit der Reizsummation ist gesteigert, d. h. obwohl die kurzdauernde Reizung keinen Erfolg hat, kann bei längerer Reizung ein starker Reflex erhalten werden. Reflexbogen, welche aus einer größeren Anzahl hintereinandergeschalteter Neurone bestehen, verlieren durch Ermüdung, Erstickung oder Narkose leichter ihre Leitfähigkeit (vgl. den Artikel „Nervensystem, Physiologie des Nervensystems"). Vom Standpunkt einer allgemeinen Physiologie ist es nicht ohne Bedeutung, daß sich die für das Zentralnervensystem charakteristischen Eigenschaften auch an anderen Formen lebendiger Substanz, die keine Nervenzellen besitzen, nachweisen lassen, sofern nur ihre Lebensvorgänge langsam ablaufen; dies ist z. B. bei den Krebsscherenmuskeln oder den Chromatophorenmuskeln der Tintenschnecken der Fall. Nichtsdestoweniger besteht zwischen der Reizbeantwortung dieser langsam reagierenden Formen lebendiger Substanz und den Reflexen ein fundamentaler Unterschied, der bedingt wird durch die ausgedehnten Beziehungen, welche zwischen den Zellen des Nervensystems bestehen und es ihm erst ermöglichen, seine Aufgabe zu erfüllen, d. h. der Koordination der zahllosen Zellen des Organismus und seiner Organe zu dienen. Die langsame Reaktionsgeschwindigkeit tritt nur in den Dienst der Koordination, indem sie die für die Koordination wichtigen Vorgänge der Summation, Bahnung und Hemmung ermöglicht.

Den Nerven, welche infolge der größeren Geschwindigkeit und geringeren Intensität ihrer Stoffwechselvorgänge weniger ermüdbar sind, kommt nur die Funktion der Erregungsleitung zu; sie leiten die Erregung im wesentlichen so weiter, wie sie sie von den Sinnes- oder Nervenzellen übernehmen.

2. Einfache Reflexe. Wenn wir zu einem Verständnis der komplizierten Reflexvorgänge kommen wollen, so müssen wir die einfachsten Reflexe aufsuchen bezw. versuchen, die komplizierteren Reflexe in ihre einfacheren Komponenten zu zerlegen. Wenn wir dies tun, so können wir drei Formen einfacher Reflexe unterscheiden. Die schnellverlaufenden, die langsamverlaufenden Reflexe und die Reflexkrämpfe.

2a) Die schnellverlaufenden Reflexe oder die Reflexzuckungen können wir z. B. am Schließmuskel der Teichmuschelschalen studieren. Liegt die Teichmuschel ruhig im Sande, so klaffen ihre Schalen. Wird die Muschel mechanisch gereizt, so wird die Schale schnell geschlossen. Wir können diesen Reflex, wie dies Biedermann getan hat, nach Oeffnung der Schalen registrieren, indem wir die eine Ansatzstelle des einen Schließmuskels mit einem Schreibhebel verbinden und die Bewegungen auf der berußten Trommel eines Kymographions aufzeichnen (vgl. den Artikel „Nervensystem, Physiologie des Nervensystems"). Ein anderer einfacher, schnellverlaufender Reflex ist der Augenlidreflex. Es ist aber auch möglich aus einem komplizierteren Reflex einen einfachen herauszugreifen. Zu diesem Zweck wird die Ansatzstelle eines Muskels durchtrennt und seine Sehne mit dem Schreibhebel verbunden. Führt das Tier nun eine komplizierte Reflexbewegung aus, an welcher der Muskel beteiligt ist, so erhalten wir eine Reflexzuckung, deren

Verlauf und Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen wir nun beobachten können. Wir können die Reflexzuckung erhalten bei Reizung der Haut, der sensiblen Nerven, des Rückenmarks und diese Zukkungen mit jenen vergleichen, welche bei Reizung der motorischen Nerven bezw. des Muskels selbst eintreten. Bei solchen Untersuchungen wirken häufig die Erregungen störend, welche vom Großhirn bezw. dem verlängerten Mark kommen. Es ist daher zweckmäßig, dem Tier einige Zeit vor dem Versuche das Rückenmark zu durchschneiden. Aber auch solche Rückenmarkstiere müssen sorgfältig behandelt werden, weil die Fesselung an sich als Reiz wirken kann, welche mit den von uns mit Absicht gesetzten Reizen interferieren.

Solche Versuche zeigen nun, daß die Höhe und die Dauer der Reflexzuckungen mit der Stärke, der Häufigkeit und der Dauer des Reizes zunehmen. Zu starke Reize, insbesondere wenn sie länger dauern, rufen Ermüdung oder Shock hervor.

Die Zeit, welche zwischen Reizmoment und dem Reflexbeginn vergeht, bezeichnen wir als Reflexzeit. Sie ist abhängig vom Zustand der Nervenzellen, welche den Reflexbogen zusammensetzen. Sauerstoffmangel, Abkühlung, Ermüdung, Narkose verlängern die Reflexzeit. Sie ist ferner abhängig von der Art der Nervenzellen. Die Nervenzellen vieler wirbelloser Tiere leiten die Erregung viel langsamer als die Nervenzellen der Wirbeltiere. Die Reflexzeit ist auch um so länger, je mehr Nervenzellen in einem Reflexbogen hintereinandergeschaltet sind, sie wird schließlich noch beeinflußt von der Reizstärke. Je stärker der Reiz, um so kürzer die Reflexzeit.

Die Reflexzeit für den Lidschluß beim Menschen beträgt 0,042 Sekunden, beim Frosch kann die Reflexzeit auf 0,008 Sekunden herabsinken. Wenn man die wirkliche Leitungszeit im Rückenmark erhalten will, muß man von der erhaltenen Reflexzeit abziehen die Leitungszeit in den Nerven und die Latenzzeit des Muskels, d. h. jene Zeit, welche bei direkter Reizung des Muskels zwischen Reizmoment und Zuckungsbeginn vergeht.

Die kurzdauernden Reflexe sind an zahlreichen Bewegungen der Tiere beteiligt. Die möglichen Bewegungskombinationen der Wirbeltiere kommen durch Verkürzung von Streck-, Beuge- und Drehmuskeln der Gelenke zustande, deren Zusammenarbeiten wir jedoch erst bei Besprechung der komplizierten Reflexe behandeln können. Es sei hier nur noch die Tatsache hervorgehoben, daß selbst die kürzesten Reflexzuckungen nicht bloß durch eine einzelne Erregungswelle ausgelöst werden, die vom Zentralnervensystem ausgeht, sondern daß die Nervenzellen auf Reiz immer eine schnelle Folge von Erregungswellen zum Erfolgsorgan senden.

2b) Die langdauernden Reflexe. Langdauernde Reflexe finden wir an allen mit einem Nervensystem begabten Tieren. Wir bezeichnen die langdauernde reflektorische Verkürzung eines Muskels als Reflextonus. Dieser ist in vielen Fällen nur quantitativ verschieden vom Reflextetanus, welcher eine längerdauernde starke Verkürzung des Muskels vorstellt. Der Reflextetanus (vgl. den Artikel „Muskeln, allgemeine Physiologie der Muskeln") steht seinerseits wieder in naher Beziehung zu den willkürlichen Verkürzungen.

Eine Reihe von Muskeln unseres Körpers befinden sich andauernd in tonischer Verkürzung. Wenn wir sitzen, so üben unsere Sitzbeine durch die Muskeln und die Haut des Gesäßes einen Druck auf die Unterlage aus. Dieser Druck reizt die sensiblen Nerven der Muskeln und der Haut mechanisch und veranlaßt dadurch die tonische Verkürzung der Muskeln, welche jetzt wie ein elastisches Kissen zwischen den Sitzbeinhöckern und der harten Unterlage eingeschaltet sind und ein Durchsitzen der Haut verhindern.

Es gibt Muskeln, welche besonders leicht tonisch reagieren. Untersuchen wir dieselben, so zeigt es sich, daß sie aus trägen Muskelfasern bestehen. Solche Muskeln können schon durch schwache Reize, welche sich in verhältnismäßig langen Intervallen folgen, zu einer glatten Verkürzung, einem vollkommenen Tetanus angeregt werden. Die Folge davon ist, daß träge Muskeln bei dauernder Verkürzung wenig Energie verbrauchen, daher weniger leicht ermüden als die flinken Muskelfasern, welche erst durch starke und schnell aufeinanderfolgende Erregungen zu dauernder Verkürzung gebracht werden. Die trägen Muskelfasern des Schließmuskels der Teichmuschel reagieren so langsam, daß sich bei dauernder Verkürzung keine Steigerung des Stoffwechsels nachweisen ließ. v. Uexküll bezeichnet solche Muskeln als Tonusmuskeln oder auch als Sperrmuskeln, die besonders dazu geeignet sind, ein Gelenk festzustellen.

Unsere Skelettmuskeln sind, wie insbesondere v. Grützner gezeigt hat, aus trägeren und flinkeren Muskelfasern zusammengesetzt. Die Trennung in flinke und träge Fasern finden wir bei vielen wirbellosen Tieren weit durchgeführt. So werden z. B. nach v. Uexküll die Stacheln des Seeigels von flinken und trägen Fasern versorgt. Die flinken Fasern bewirken die schnellen Bewegungen der Stacheln, die trägen Fasern stellen die Stacheln fest. v. Uexküll hat abwechselnd bald die einen bald die anderen Fasern durchschnitten und konnte so ihre

verschiedene Funktion direkt demonstrieren. Die gleiche Trennung ist auch bei den Schließmuskeln der Muscheln vorhanden. Jeder Schließmuskel besteht aus zwei, anatomisch trennbaren Portionen, von denen die eine aus flinken, die andere aus trägen Fasern besteht. Die flinken Fasern bewirken den schnellen Schalenschluß, die trägen Fasern können die Schalen längere Zeit geschlossen halten.

Zu den langdauernden Reflexen gehören auch die Gefäßreflexe. Die Muskeln der Blutgefäße befinden sich dauernd in tonischer Verkürzung, welche verschwindet, wenn die Gefäßnerven durchschnitten oder das Zentralnervensystem zerstört wird. Bei Reizung bestimmter Sinnesnerven oder Abschnitte des Zentralnervensystems kommt es zu Verengerung eines ganzen Gefäßgebietes. Beim Erschrecken verengern sich sämtliche Blutgefäße des Gesichts, die Gehirngefäße können sich so stark verengern, daß die Großhinrinde Sauerstoffmangel leidet und die Erregbarkeit verliert. Es tritt dann Bewußtlosigkeit ein. Diese gleichzeitige Kontraktion eines großen Gefäßgebietes liegt an der Verteilung der Nervenzellen im Reflexbogen, dieselbe ist in Figur 9 wieder-

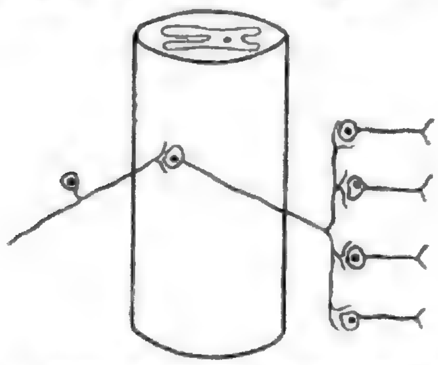


Fig. 9. Anordnung der Nervenzellen in einem Reflexbogen des sympathischen Nervensystems.

gegeben. Das aus dem Rückenmark austretende motorische Neuron ist mit einer großen Anzahl von Nervenzellen eines sympathischen Ganglions und jede dieser Nervenzellen ist wieder mit einer großen Zahl von Muskelzellen verbunden. Wir finden eine derartige Anordnung der Zellen des Reflexbogens überall dort, wo es sich um gleichzeitige Innervation vieler Elemente handelt, so z. B. auch bei der Innervation der Drüsen.

2c) Reflexkrämpfe. Wenn die Erregbarkeit des Nervensystems gesteigert ist, so werden die die Sinnesorgane treffenden Reize mit stärkeren und ausgedehnteren Reflexen beantwortet. Es kommt zu Krämpfen, die jedoch ein verschiedenes Aussehen haben und deren Entstehungsbedingungen verschieden sein können.

Ganz charakteristisch sind die Strychninkrämpfe. Das Strychnin greift an den sensiblen Ganglienzellen, den Koordinationszellen des Reflexbogens an. Durch die Koordinationszellen werden die Erregungen auf eine große Reihe von Ganglienzellen des Nervensystems übertragen. Ist ihre Erregbarkeit gesteigert, so kontrahieren sich bei Reizung eines sensiblen Nerven eine große Zahl von Muskeln gleichzeitig. Durch diese Kontraktion werden die sensiblen Nerven der Muskeln und Gelenke mechanisch gereizt, und dieser Reiz genügt, um die in ihrer Erregbarkeit gesteigerten sensiblen Nervenzellen aufs neue zu erregen. So kommt es zu einem charakteristischen Streckkrampf, der solange anhält, bis die in ihrer Erregbarkeit gesteigerten sensiblen Ganglienzellen ermüdet sind.

Ein Mensch, welcher mit Strychnin oder mit dem in gleicher Weise wirkenden Gifte der Tetanusbakterien infiziert ist, zeigt auf den schwächsten Reiz hin, die charakteristischen Streckkrämpfe. Es kommt zu einer Streckung aller Gelenke, da die Streckmuskeln in der Regel viel kräftiger als die Beugemuskeln sind; die Beugemuskeln sind jedoch während des Krampfanfalles gleichfalls kontrahiert. Während des Krampfanfalles wird der Kopf in ganz charakteristischer Weise nach rückwärts geworfen (Opistotonus), die Zähne werden heftig aufeinander gebissen, sodaß sie knirschen (Trismus). Gleichzeitig mit dem Krampfanfall kommt es zu einer krampfartigen Verengerung der Blutgefäße, der Blutdruck zeigt einen starken Anstieg. Auch bei den Wirbellosen kommt es unter Strychninwirkung zu charakteristischen Krämpfen. So rollen sich bei den Tintenschnecken im Krampfanfall die Arme ein, das im Mantel enthaltene Wasser, die im Tintensack enthaltene Tinte wird ausgespritzt und auch die Chromatophoren der Haut werden ausgebreitet, so daß sich die Tiere während des Krampfanfalles dunkel färben, Läßt der Krampf nach, so erblaßt die Haut wieder, um sich bei neuem Krampf wieder gleichmäßig dunkel zu färben.

Zu einer anderen Krampfform führt, wie Baglioni durch ausgedehnte Untersuchungen gezeigt hat, eine Reihe andere Gifte, zu welchen in erster Linie das Phenol (Karbolsäure) und seine Derivate gehören. Das Phenol steigert die Erregbarkeit der motorischen Neurone. Da zu diesen die Erregungswellen kommen, nachdem sie durch die Koordinationszellen eine gewisse Ordnung erfahren haben, so können die mit Phenol vergifteten Tiere noch koordinierte Bewegungen ausführen. Die Bewegungen sind jedoch durch häufige Zuckungen unterbrochen und gestört, in vorgeschrittenen Stadien der Vergiftung kommt es zu starken

Unregelmäßigkeiten der Bewegungen, zu klonischen Krämpfen, die durch starke, zuckungsartige Bewegungen in den verschiedenen Muskelgruppen des Körpers charakterisiert sind.

Wunderbar ist das Farbenspiel der mit Karbolsäure vergifteten Tintenschnecken. Während die Haut des ruhig im Aquarium sitzenden Tieres blaß ist, zeigt die Haut des mit Phenol vergifteten Tieres eine stetig wechselnde Färbung. Bald hier bald dort schießen Farbenblitze auf, um ebenso schnell wieder zu verschwinden, auch die Körpermuskeln zeigen charakteristische, klonische Krämpfe. Die Saugnäpfe der Arme bewegen sich unregelmäßig nach allen Richtungen. Das motorische Zentrum der Chromatophorenmuskeln liegt in der Gehirnganglienmasse. Wird die Verbindung derselben mit den Chromatophoren durchschnitten, so hören die Chromatophorenkrämpfe auf, die der Körpermuskulatur bestehen weiter, da ihre motorischen Nervenzellen in peripheren Ganglien liegen.

Eine andere Art von Reflexkrämpfen wird durch Sauerstoffmangel hervorgerufen, es sind dies die von Tenner-Kußmaul beschriebenen Krämpfe. Wird ein Tier durch Verbluten getötet, so äußert sich der Beginn der Erstickung in einer Vertiefung der Atmung, die Atemmuskeln arbeiten immer angestrengter. Wir bezeichnen diese Art der Atmung als Dyspnoe. Dann kommt ein Stadium der Erstickung, in welchem gleichzeitig mit der Innervation der Atemmuskeln eine krampfartige Bewegung durch die Körpermuskulatur läuft, und schließlich verfällt das Tier in Streckkrämpfe. Diese Krämpfe werden in der Regel auf die die Erregbarkeit steigernde Wirkung von Erstickungsstoffen zurückgeführt, welche infolge des Sauerstoffmangels im Blute kreisen. Es ist jedoch mehr als wahrscheinlich, daß die Erstickungskrämpfe nur durch eine scheinbare Steigerung der Erregbarkeit zustandekommen, indem durch die lähmende Wirkung der Erstickungsstoffe die Erregungsvorgänge im Zentralnervensystem verlangsamt werden und dadurch die Summationsfähigkeit für die Reize, welche dem Nervensystem andauernd von der Peripherie zugeleitet werden, gesteigert wird (vgl. darüber den Artikel „Nervensystem, Physiologie des Nervensystems").

Schließlich können auch Krämpfe durch sehr starke Reize hervorgerufen werden. Reizen wir z. B. die Haut oder einen sensiblen Nerven mit sehr starken elektrischen Strömen, dann treten, wie Pflüger gezeigt hat, zuerst in den Muskeln, welche in der Nähe der Reizstelle gelegen sind, krampfartige Bewegungen auf, die sich bei weitergehender Reizung über den ganzen Körper ausbreiten können.

Die Reflexkrämpfe beruhen im Prinzip auf demselben Mechanismus wie der Reflextonus. Infolge der wirklichen oder bloß scheinbaren Steigerung der Reflexerregbarkeit, oder infolge sehr starker Reizung breiten sich die Krämpfe über große Partien des Körpers aus, und die Wiedererregung der Sinnesorgane in der Peripherie bezw. die fortdauernde Reizung löst so lange Krämpfe aus, bis die Ermüdung des Nervensystems eingetreten ist.

3. Koordinierte Reflexe. 3a) Synergistische Reflexe. Im vorhergehenden Abschnitt haben wir nur einfache Reflexe oder solche, welche unter möglichst einfachen Bedingungen studiert worden sind, untersucht. An den meisten Reflexen sind jedoch eine große Zahl verschiedener Reflexbögen beteiligt, die große Mehrzahl der Reflexe stellt Reflexkoordinationen vor, welche durch einander koordinierte Reflexbögen vermittelt werden.

Wenn wir ein Gelenk unseres Körpers beugen, so geschieht dies nicht bloß durch Innervation eines Muskels, sondern es sind mehrere Muskeln an der Beugung beteiligt. Die Reflexbögen dieser Muskeln, welche gemeinsam die Beugung des Gelenkes veranlassen, werden als synergistische Reflexbögen bezeichnet. Wenn wir unser Kniegelenk beugen, so beugen wir in vielen Fällen auch das Hüftgelenk, dies ist z. B. beim Anziehen des Beines an den Körper der Fall. Auch diese Muskeln und ihre Reflexbögen bezeichnen wir als synergistische, da sie bei der Reflexkombination, welche ein Anziehen des Beines an den Körper herbeiführt, gleichzeitig und in gleichem Sinne tätig sind.

3b) Antagonistische Reflexe. Wenn durch einen Reiz die Beugemuskeln eines Gelenkes zur Kontraktion gebracht werden, so erschlaffen gleichzeitig die Streckmuskeln. Man hat früher vielfach die Meinung ausgesprochen, daß bei Beugung eines Gelenkes die Streckmuskeln passiv gedehnt werden. Diese Annahme trifft jedoch nicht zu. Wenn die Ansatzstelle eines Beuge- und Streckmuskels eines Gelenkes losgetrennt und mit je einem Schreibhebel verbunden wird, so sieht man auch unter diesen Bedingungen bei Reizung die Kontraktion der Beugemuskeln mit einer Erschlaffung der Streckmuskeln, die Kontraktion der Streckmuskeln mit einer Erschlaffung der Beugemuskeln einhergehen. Die Kurve der Figur 10 kann als Beispiel eines solchen Versuches dienen. Die obere Kurve gibt die Kontraktion des Beugemuskels, die untere die des Streckmuskels wieder, die Verdickung der untersten Linie zeigt die Dauer der elektrischen Reizung

des sensiblen Hüftnerven an, welche den Reflex auslöst. In diesem Falle kann natürlich von einer passiven Dehnung der Beugemuskeln durch die Strecker und umgekehrt nicht die Rede sein, sondern es er-



Fig. 10. Kurve einer antagonistischen Innervation. Die obere Kurve gibt das Verhalten der Beugemuskeln, die untere Kurve das Verhalten der Streckmuskeln wieder.

gibt sich aus derartigen Versuchen die Tatsache, daß bei Erregung des Reflexbogens der Beuger der Reflexbogen der Strecker des Gelenkes gehemmt wird.

Einen derartigen Reflex bezeichnen wir als einen antagonistischen. Die Muskeln, welche im entgegengesetzten Sinne an einem oder mehreren Gelenken angreifen, werden Antagonisten genannt. Wir verdanken insbesondere den Untersuchungen Sherringtons und seiner Mitarbeiter die Kenntnis von der weiten Verbreitung der antagonistischen Reflexe und von ihrer Wichtigkeit für das Zustandekommen jeder Reflexkoordination.

Die gleichzeitige Reizung synergistischer Reflexbögen hat eine Verstärkung, die gleichzeitige Reizung antagonistischer Reflexbögen eine Abschwächung d. i. eine Hemmung des Reflexes zur Folge. Es muß also zwischen dem Reflexbogen eines Muskels und dem seines Antagonisten eine nervöse Verbindung bestehen, deren Erregung eine Hemmung des antagonistischen Muskels herbeiführt. Ueber die Natur dieser Verbindung und über das Zustandekommen der Hemmung geben uns Versuche Aufschluß, bei welchen vor der Reizung beide Muskeln erschlafft sind, wir sehen dann bei Reizung des Reflexbogens des Streckmuskels nicht nur eine starke Kontraktion des Streckmuskels, sondern auch eine schwache Kontraktion des Beugemuskels eintreten, Ist der Beugemuskel schwach kontrahiert. so geht der Hemmung eine kurzdauernde Erregung voraus. Die Kurve der Figur 11 zeigt einen solchen Fall. Reizung der Haut über einem Beugemuskel der hinteren Extremität eines Rückenmarksfrosches ergibt eine schwache Kontraktion des Beugemuskels. Wird nun die Haut über den Streckmuskeln mechanisch gereizt, so kontrahiert sich der Strecker des Gelenkes, der Hemmung des Beugers geht eine kurzdauernde Erregung voraus. Wir bezeichnen solche kurzdauernden Verkürzungen als Anfangstetani, welche dadurch zustandekommen, daß der Reflexbogen, welcher die Hemmung vermittelt, die Erregungen nur schwach leitet und sehr schnell ermüdet. Durch Zusammenwirken beider Erregungen in der gemeinsamen Strecke kommt es zu einer schnell einsetzenden relativen Ermüdung; die Hemmung ist nichts anderes als Ermüdung. Die Abschwächung der Erregung kann dadurch zustande kommen, daß, wie dies in Figur 12 eingezeichnet ist, der hemmende Reflexbogen ein Neuron mehr als der erregende Reflexbogen besitzt. Wir wissen nämlich, daß die Erregung mit um so stärkerem Dekrement geleitet wird, und daß die Ermüdbarkeit um so mehr hervortritt, je mehr Nervenzellen im Reflexbogen hintereinander geschaltet sind. Daß in der Tat die Intensität der Erregung für den Eintritt der Hemmung maßgebend ist, geht einerseits aus der Untersuchung einfacher Hemmungsmechanismen wie z. B. dem der Krebsscherenmuskeln hervor, andererseits aus der

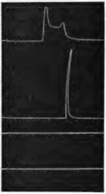


Fig. 11. Antagonistische Innervation. Die Kurve zeigt das der Hemmung der Beugemuskeln (obere Kurve) eine kurzdauernde Erregung vorausgeht.

Tatsache, daß bei Verstärkung der Reize, der hemmende Reizerfolg in einen erregenden umschlägt.

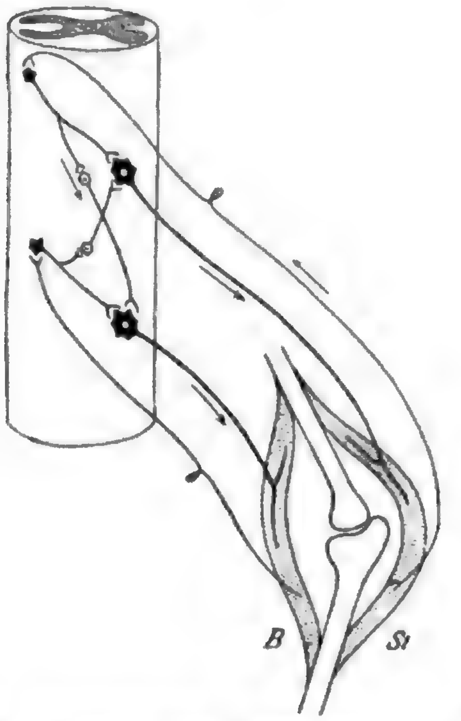


Fig. 12. Schematische Darstellung der Beziehungen der Reflexbögen antagonistischer Muskeln.

3c) Reflexketten. Mit der Anführung der synergistischen und antagonistischen Beziehungen der Reflexbögen ist jedoch die Zahl der möglichen Reflexkoordinationen noch nicht erschöpft. Die Beobachtung lehrt, daß bei vielen Reflexbewegungen, die an ihnen beteiligten Muskeln nicht gleichzeitig erregt bezw. gehemmt werden, sondern daß verschiedene Muskeln nacheinander in Aktion treten. Es bestehen selbst einfachere Reflexbewegungen aus einer Kette von Reflexen, bei welcher sich Erregung und Hemmung synergistischer und antagonistischer Muskeln in einer bestimmten, für die ausgeführte Reflexbewegung charakteristischen Folge aneinander reihen. Ein solcher Reflex ist z. B. der sogenannte Wischreflex des Rückenmarksfrosches. Bringt man auf die Flankenhaut des Tieres ein Stück mit Essigsäure getränktes Fließpapier, so führt das Tier mit der hinteren Extremität der gereizten Seite eine ganz charakteristische Bewegung aus. Es erfolgt zuerst ein Beinanziehreflex, welcher durch Kontraktion der Beugemuskeln der hinteren Extremität zustandekommt. Dann wird die Extremität noch weiter und zwar nach einwärts gehoben bis die Zehen in die Höhe des Reizortes gebracht sind, dann wird durch Streckbewegungen, insbesondere des Knie- und Sprunggelenkes, eine Wischbewegung ausgeführt, durch welche das als Reiz wirkende Papier entfernt wird. In dieser Beschreibung des Wischreflexes sind nur seine Hauptphasen angeführt. In Wirklichkeit sind wir noch weit davon entfernt, die Beteiligung der einzelnen Muskeln an dem Reflex und die zeitlichen Beziehungen ihrer Kontraktionen zu übersehen.

Zu einem tiefergehenden Verständnis der Reflexketten können wir nur gelangen, wenn wir sie unter einfachsten Verhältnissen aufsuchen und analysieren. Eine einfache Form der Reflexverkettung liegt in der peristaltischen Bewegung vor. Die Peristaltik tritt uns an allen muskulösen Hohlorganen entgegen, an der Speiseröhre, am Darm, am Herzen, am Uterus usw. Die Wandungen dieser Organe werden in der Regel von zwei Muskelschichten gebildet, einer Ring- und einer Längsmuskelschicht. Die Verkürzung der Ringmuskulatur an einer Stelle bewirkt eine ringförmige Einziehung des Organes. Wandert dieselbe von einem Ende des Organes zum anderen, so wird der Inhalt des Organes dadurch vorwärts getrieben. Die Verkürzung der Längsmuskeln ruft eine Verkürzung des Hohlorganes und eine Erweiterung seines Lumens hervor. Da in der Richtung der Austreibung die Verkürzung der Längsmuskulatur der Verkürzung der Ringmuskeln vorangeht, so fällt der durch die fortschreitende Kontraktion der Ringmuskeln bewegte Organinhalt förmlich in das erweiterte Lumen. Die Peristaltik stellt einen Reflex vor, welcher durch ein Nervensystem vermittelt wird, das entweder in oder außerhalb des Organes gelegen ist.

Aber die angeführten Organe bieten keine günstigen Bedingungen für das Studium der peristaltischen Bewegungen, da die mit den Muskeln in inniger Beziehung stehenden Nervenzellen und ihre Nerven schwer isoliert gereizt und nicht ohne Schädigung der Muskulatur ausgeschnitten werden können.

In einfacherer Form tritt uns die Peristaltik bei den Schnecken entgegen, wo sei namentlich durch Biedermann eingehend studiert worden ist. Diese Tiere bewegen sich durch rhythmisches Verkürzen und Verlängern ihres Fußes vorwärts, welches wellenförmig über den Fuß abläuft. Ein einfacher Versuch kann diesen Bewegungsmodus demonstrieren. Wenn wir eine Weinbergschnecke auf eine Glasplatte kriechen lassen und diese dann umdrehen, so können wir das reizende Wellenspiel des Fußes genau beobachten, wir sehen eine Kontraktionswelle nach der anderen in schneller Folge über den Fuß ablaufen und dadurch die Fortbewegung des Tieres zustandekommen. Ebenso schön können wir diese Art der peristaltischen Bewegungen bei

einzelnen Meeresschnecken beobachten. So ist z. B. bei Aplysia limacina, die in sehr großen Exemplaren im Mittelmeer vorkommt, auf jeder Seite ein Lappen des Fußes sehr stark entwickelt, über welchen rhythmische Wellen von vorn nach rückwärts ablaufen und bewirken, daß sich das Tier schwimmend vorwärts bewegt. Diese Lappen werden vielfach auch als Flügel bezeichnet, ihre Bewegungen erinnern an die schönen Bewegungen, welche eine Serpentintänzerin mit ihrem Gewand ausführt.

Die Peristaltik der Aplysienflügel wird durch ein Nervensystem vermittelt, das außerhalb des Flügels gelegen ist. Figur 13 gibt eine Uebersicht über die Anordnung der Teile des Nervensystems. Wir unterscheiden zwei Gehirn- und zwei Pedalganglien. Von letzteren gehen lange Nerven zu den Flügeln, treten aber mit der Muskulatur derselben nicht direkt sondern durch zwischengeschaltete Nervenzellen in Beziehung. Werden die Verbindungsnerven, welche ein Pedalganglion mit dem Gehirnganglion der gleichen Seite und dem Pedalganglion der anderen Seite verbinden, durchschnitten, so kann das auf diese Weise isolierte Pedalganglion die Peristaltik noch vermitteln. Schneiden wir jedoch auch das Pedalganglion fort, so steht die Peristaltik dauernd still. Wenn wir am intakten Tier den Flügel durch einen bis an den Körper des Tieres reichenden Schnitt in zwei Teile zerlegen, ohne dabei einen Flügelnerven zu verletzen, so sehen wir, daß die Bewegungswelle über den Flügel hinwegläuft, als wäre der Schnitt nicht vorhanden.

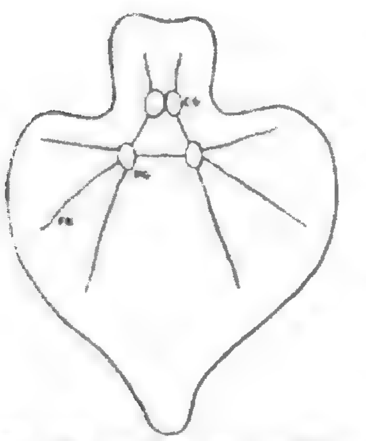


Fig. 13. Anordnung der Teile des Nervensystems von Aplysia limacina. CG Cerebralganglion, PG Pedalganglion, FN Flügelnerv.

Steht der Flügellappen still, so kann durch mechanische Reizung des einen Abschnittes der andere reflektorisch erregt werden. Wenn aber nach Durchschneidung des Flügels noch ein mittlerer Flügelnerv durchtrennt wird, so läuft die Bewegungswelle nur bis zur Durchschneidungsstelle, der hintere Abschnitt des Flügels bleibt in Ruhe. Wir würden demnach sagen, die peristaltische Bewegungswelle des Aplysienflügels stellt eine Reflexverkettung vor, welche ihren Anfang nimmt am höchst erregbaren, vorderen Abschnitt des Flügels und von dort nach rückwärts läuft, indem durch die Kontraktion jedes Flügelabschnittes der nächstfolgende reflektorisch erregt wird. Jede Phase der Schwimmbewegung löst die nächste aus, der feinere Ablauf der Bewegung wird jedoch durch Erregungen geregelt, welche durch das Gehirnganglion vermittelt werden.

Der Innervationsmechanismus des Aplysienflügels ist dadurch vereinfacht, daß zwischen den Flügelnerven und den sich nach verschiedenen Richtungen durchkreuzenden Muskelfasern des Flügels noch Nervenzellen eingeschaltet sind, welche ähnlich wie die Nervenzellen des sympathischen Nervensystems die Aufgabe haben, eine große Anzahl von Muskelzellen zu gemeinsamer Verkürzung anzuregen. Wenn wir einen Flügelnerven elektrisch reizen, dann kontrahiert sich der von diesem Nerven innervierte Flügelabschnitt wie eine einzige, große Muskelfaser.

Während die wellenförmigen Flügelbewegungen der Aplysien nur durch die Nervenzellen eines einzigen Ganglions vermittelt werden, ist bei der peristaltischen Bewegung der Würmer die Kette der den Bauchstrang zusammensetzenden motorischen Ganglien beteiligt. Der Mechanismus ist aber, wie die schönen Untersuchungen von Friedländer und Biedermann gezeigt haben, derselbe. Es ist offenbar die Wiedererregung in der Peripherie, welche den Ablauf der Bewegung über den Tierkörper beherrscht. Die Nervenfasern, welche die Kommissuren des Bauchstranges zusammensetzen, dienen einerseits der Verknüpfung der motorischen Ganglien, andererseits stellen sie die Verbindung zwischen den sensiblen Gehirnganglien her, welche die vordersten Ganglien des Nervensystems (siehe Figur 14) sind. Reizen wir einen in Bewegung befindlichen Regenwurm am Vorderende, so zuckt der ganze Körper zusammen. Den gleichen Reflex können wir auch an einer schwimmenden Aplysia beobachten. Reizen wir das Vorderende derselben mechanisch, so zuckt die Körpermuskulatur zusammen, die Bewegung der Flügel wird gehemmt, das Tier sinkt langsam zu Boden. Wir müssen sowohl für die Schnecken als auch die Würmer annehmen, daß die insbesondere am Vorderende angehäuften Sinneszellen unter Vermittelung der Gehirn-

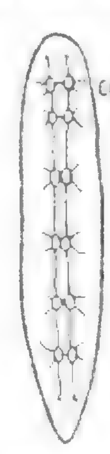


Fig. 14. Schema des Nervensystems eines Wurmes. CG Gehirnganglion.

ganglien die peristaltischen Bewegungen in den verschiedensten Richtungen zu beeinflussen imstande sind.

Eine einzige große Reflexverkettung ist der Vorgang der Nahrungsaufnahme und der Verwertung der Nahrung bis zur Ausscheidung des Kotes. Die ersten Akte und der letzte erfolgen in der Regel willkürlich, alles übrige wird durch Reflexe vermittelt, von welchen jeder den nächstfolgenden auslöst. Mit der Aufnahme der Nahrung beginnt die Speichelsekretion und das Kauen und die erste Phase der Schluckbewegung. Der Speisebrei gelangt durch die Peristaltik der Speiseröhre in den Magen, wo er eine starke Sekretion saueren Magensaftes auslöst. Ist der Speisebrei durch die Fermente des Magensaftes verflüssigt und angedaut, so öffnet sich auf reflektorischem Wege der Pförtner des Magens und läßt den Mageninhalt in den Darm eintreten. Die Darmsäfte haben eine alkalische Reaktion, wird diese durch den saueren Mageninhalt sauer, so schließt sich einerseits der Pförtner, andererseits wird gleichfalls auf reflektorischem Wege die Sekretion alkalischen Drüsensaftes angeregt, welcher die alkalische Reaktion des Darmes wieder herstellt. So wird auf reflektorischem Wege die Darmbewegung, die Reaktion des Darminhaltes geregelt und in gleicher Weise geht auch die Sekretion der Fermente vor sich, welche die Nahrung lösen; auch die einzelnen Sekretionsakte greifen ineinander wie die Glieder einer Kette.

Die Analyse der Reflexkette, welche der peristaltischen Bewegung zugrunde liegt, ist von großer Wichtigkeit, da es von den peristaltischen Bewegungen Uebergänge gibt zu allen Reflexbewegungen, selbst zu jenen der höheren Säugetiere und des Menschen. Es besteht eine nahe Beziehung der Peristaltik zu den Schwimmbewegungen der Fische, zur Fortbewegung der Schlangen, zum Fliegen der Vögel. Es bestehen Beziehungen zu den Bewegungen der Gliedertiere. Man braucht nur die Fußbewegungen eines Tausendfüßlers oder eines vielfüßigen Krebses zu beobachten, um diese Analogie zu erkennen.

Bei den Gliedertieren mit wenigen Füßen oder bei den Wirbeltieren erscheint diese Analogie nicht ohne weiteres gegeben, es ist jedoch sehr interessant, daß die Larven vieler Käfer, die Raupen der Schmetterlinge, die Embryonen vieler Wirbeltiere, z. B. die Froschembryonen charakteristische peristaltische Bewegungen ausführen. Die Peristaltik scheint jene Reflexkoordination zu sein, welche schon in einem frühen Stadium der Tierentwickelung entstanden ist, sie steht sicher in naher Beziehung zu anderen wellenförmigen Reizbeantwortungen, die ohne Vermittlung eines Nervensystems zustande kommen, wie z. B. zu der Flimmerbewegung.

Wir wollen nun zu der Reflexkoordination der Wirbeltiere übergehen, über die insbesondere durch Sherrington eine große Zahl von Untersuchungen angestellt worden sind. Sherrington hat über seine Erfahrungen in dem Buche „The integrative action of nervous system" zusammenfassend berichtet.

Wenn wir die Reflexbewegungen eines Hundes studieren, so begegnen wir einer Reihe von Reflexen, welche sich voneinander unterscheiden, von denen aber jeder an sich einen mehr oder weniger typischen Verlauf aufweist. Sherrington bezeichnet diese Reflexe als Reflextypen. Ein charakteristischer Reflex ist z. B. der Kratzreflex. Wird die Flankenhaut eines Rückenmarkshundes mechanisch oder elektrisch gereizt, so beginnt die hintere Extremität der gleichen Seite rhythmische Kratzbewegungen auszuführen. Eine andere Reflextype ist der Beinanziehreflex, welchen der Hinterfuß ausführt, wenn er mechanisch oder elektrisch gereizt wird. Wieder ein anderer Reflex ist der Streckreflex in der hinteren Extremität, welcher bei Reizung des Hinterbeines der anderen Seite eintritt.

Am Zustandekommen aller dieser Reflexe sind erstens die Reize beteiligt, welche ihn hervorrufen, zweitens die Reizung der sensiblen Nerven der an der Bewegung beteiligten Muskeln und Gelenke. Sherrington spricht von einem exterozeptiven und einem proprio- bezw. interozeptiven Reizfeld. Schneiden wir die sensiblen Nerven, welche von den tätigen Muskeln und Gelenken kommen, durch, so treten tiefgehende Störungen im Ablauf der Reflexe ein, wir bezeichnen diese Störungen auch als Ataxien. In dieser Beziehung besteht also eine vollkommene Uebereinstimmung zwischen den Reflextypen und den peristaltischen Bewegungen, auch die Peristaltik ist eine Reflextype.

Die Ausdehnung des Feldes an der Flanke des Hundes, von welchem aus der Kratzreflex erhalten werden kann, ist sehr groß, sie ist in Figur 15 wiedergegeben. Von der Mitte des Feldes kann man den Reflex schon mit geringen Reizintensitäten erhalten, während an der Peripherie zum Hervorrufen des Reflexes starke Reize notwendig sind. Auch die Intensität der Reflexbewegung ist bei Reizung an der Peripherie geringer. Die stärksten Kratzreflexe werden von der Mitte des Rezeptionsfeldes erhalten. Man kann diese Beobachtungen durch die Annahme verständlich machen, daß an dem Reflex eine sehr große Zahl motorischer Neurone beteiligt ist. Die meisten dieser Neurone werden von der Erregung getroffen,

wenn die Mitte des Rezeptionsfeldes gereizt wird. Trifft der Reiz die Peripherie des Rezeptionsfeldes, so wird nur ein Teil der motorischen Neurone in Erregung versetzt, und zwar verschiedene Neurone bei Reizung

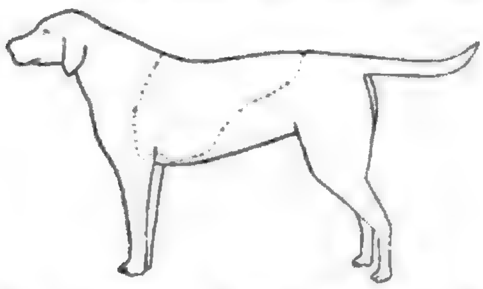


Fig. 15. Ausdehnung des Hautfeldes, bei dessen Reizung der Kratzreflex zu erhalten ist. Nach Sherrington.

an verschiedenen Stellen der Peripherie. Der Kratzreflex verläuft verschieden, je nach der Lage der Reizstelle im Perzeptionsfeld. Befindet sich die Reizstelle mehr kopfwärts, so wird die kratzende Extremität mehr nach vorn gebracht, greift der Reiz mehr rückwärts an, so kratzt die Extremität an einer mehr rückwärts gelegenen Stelle.

Zwischen den einzelnen Reflextypen bestehen enge Beziehungen. Zum Teil sind am Kratz und Beinanziehreflex die gleichen Muskeln beteiligt, oder es treten wie beim Beinanzieh- und gekreuzten Streckreflex antagonistische Muskeln in Aktion, solche Reflexe schließen sich gegenseitig aus. Rufen wir durch Reizung der rechten Flankenhaut einen rechtsseitigen Kratzreflex hervor und reizen wir dann die Pfote der kratzenden Extremität elektrisch, so hört der Kratzreflex auf und das Bein wird angezogen. Ob dieser oder jener Reflex einsetzt, ist lediglich von der Reizintensität abhängig.

Andere Reflexe treten gleichzeitig auf. Bei Reizung der rechten Flankenhaut bekommen wir einen rechtsseitigen Kratzreflex, gleichzeitig erhalten wir einen Streckreflex der hinteren Extremität der anderen Seite. Die Bedeutung dieses Reflexes ist verständlich, denn wenn der Hund sich mit einer Extremität kratzt, so streckt er die drei anderen, um sein Gleichgewicht zu erhalten.

Entsprechende Beziehungen zwischen den vier Extremitäten und der Rumpfmuskulatur lassen sich bei vielen Wirbeltieren nachweisen. Figur 16 zeigt z. B. einen Rückenmarksfrosch, dessen linke hintere Extremität mechanisch gereizt wird, indem wir sie anfassen und strecken. Das Rückenmarkstier reagiert auf diesen Reiz mit einer Streckung der linken vorderen und einer Beugung der rechten vorderen und hinteren Extremität. Das umgekehrte Verhalten beobachten wir bei Reizung der rechten Hinterextremität.

Es gibt auch Reflexe, welche unabhängig voneinander zu sein scheinen. Wir können beim Hund gleichzeitig einen Kratz- und einen Schwanzreflex auslösen. Kneifen wir jedoch den Schwanz stark, so wird der Kratzreflex gehemmt.

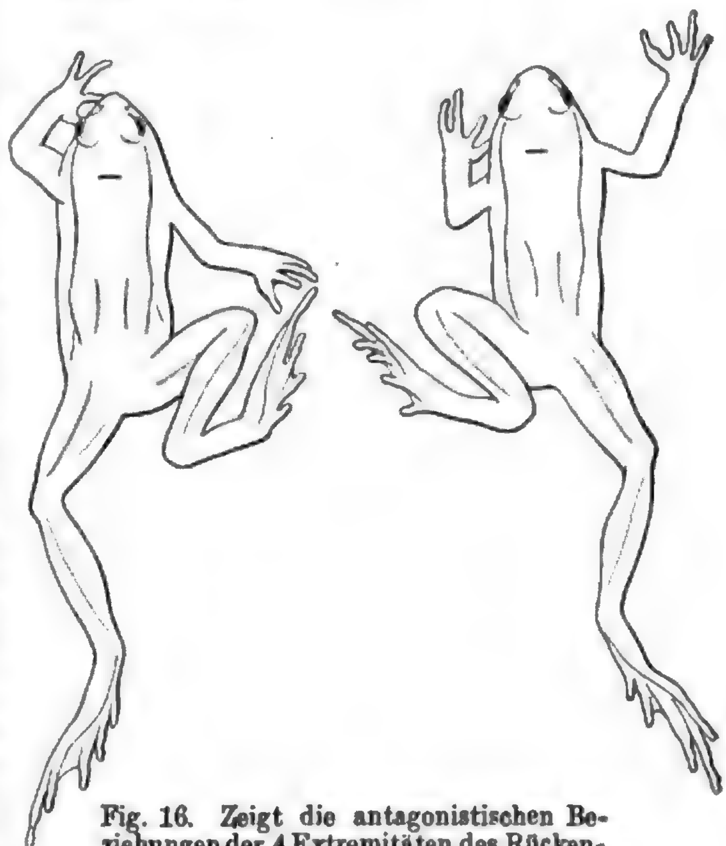


Fig. 16. Zeigt die antagonistischen Beziehungen der 4 Extremitäten des Rückenmarksfrosches.

3d) Rhythmische Reflexe. Besonderes Interesse bieten die rhythmischen Reflexe. Die Medusen zeigen rhythmische Kontraktionen ihres Körpers, der Kratzreflex des Hundes ist rhythmisch, rhythmisch ist auch die Innervation der Atmung. v. Uexküll hat die Annahme ausgesprochen, daß die rhythmischen Reflexe dadurch zustandekommen, daß die Erregung, welche von der Reizstelle ausgeht, immer zu den gedehnten Muskeln hinfließt. Eine solche Annahme läßt sich jedoch jetzt nicht mehr halten, wir müssen vielmehr an Hand unserer Erfahrungen über das Zustandekommen der Reflexhemmung annehmen, daß die zu den motorischen Neuronen kommenden Erregungen diejenigen motorischen Neurone, welche sich relativ in Ruhe befinden, erregen, die tätigen dagegen hemmen. Es kommt in den motorischen Neuronen zu einer Interferenz der Erregungen, welche einerseits von der Reizstelle, andererseits von den sensiblen Nerven der tätigen Muskeln kommen. Nach den Angaben von Magnus erlischt der rhythmische Kratzreflex nach Durchschneidung der sensiblen Nerven, welche von den

beim Reflex beteiligten Muskeln kommen. Sherrington hat allerdings in jüngster Zeit angegeben, daß die rhythmische Innervation auch nach Durchschneidung der sensiblen Nerven weiterbesteht. Aehnliches wird ja auch von der rhythmischen Innervation der Atmung angegeben, bei welcher sicher die chemische Reizung des Atemzentrums durch das Blut von Bedeutung ist. Bei keiner Innervation kann man jedoch die Wichtigkeit der Wiedererregung der sensiblen Nerven so eindringlich demonstrieren, wie an dem Atemzentrum. Es sei hier auf die grundlegenden Untersuchungen von Hering und Breuer über die Selbststeuerung der Atmung durch die sensiblen Lungennerven hingewiesen. Diese Nerven werden durch die Ausdehnung der Lungen mechanisch gereizt und die von ihnen ausgehende Erregung reguliert die Ein- und Ausatmungsbewegungen.

Binden wir einem Kaninchen eine Kanüle in die Luftröhre und eröffnen wir dann den Brustkorb, so sehen wir die Lungen zusammenfallen, können sie aber durch Aufblasen wieder zur Entfaltung bringen. Die noch weiter bestehende Ateminnervation wird durch das rhythmische Heben und Senken der Rippen, des Zwerchfelles, der Nasenflügel angezeigt. Alle diese Bewegungen sind jedoch fruchtlos, da die Lunge zusammengefallen im Brustkorb liegt. Das Tier würde unfehlbar ersticken, wenn wir nicht frische Luft durch die Luftröhre einblasen würden. Dabei machen wir die Beobachtung, daß sich bei rhythmischer Einblasung der Rhythmus der Ateminnervation dem Rhythmus der Einblasungen anpaßt. Es wird der Atemrhythmus durch die Erregungen geregelt, welche durch mechanische Reizung der sensiblen Lungennerven in der ausgedehnten Lunge entstehen. Je stärker die Lunge gebläht wird, um so stärker ist auch die mechanische Reizung der sensiblen Enden. In der Tat läßt sich, wie Schulgin gezeigt hat, durch schwache elektrische Reizung der Atemnerven eine Einatmung, durch stärkere Reizung eine Ausatmung hervorrufen. Nach Durchschneidung der sensiblen Atemnerven fällt die Beeinflussung der Ateminnervationen durch die rhythmischen Einblasungen fort.

Wir können also auch in bezug auf die rhythmischen Reflexe sagen, daß für ihr Zustandekommen die Wiedererregung der sensiblen Nerven der beim Reflex beteiligten Organe überaus wichtig ist.

4. **Die Reflexumkehr.** Bei dem Studium der Reflexvorgänge können wir häufig die Beobachtung machen, daß bei Reizung an ein und derselben Stelle des Körpers die Reflexe gerade entgegengesetzt ausfallen. Insbesondere die Versuche v. Uexküll's an Seeigeln haben unsere Aufmerksamkeit auf diese Tatsache gelenkt.

Die Stacheln der Seeigel sind durch Kugelgelenke mit der Schale des Seeigels verbunden, sie können durch radiär angreifende Muskeln nach allen Seiten bewegt werden. Jeder Stachel ist an der Basis von einem nervösen Ring umgeben, der aus Nervenzellen und Nervenfasern besteht und der das Reflexzentrum des Stachels vorstellt. Wird eine Stelle der Seeigelhaut mechanisch gereizt, so neigen sich die in der Umgebung der Reizstelle liegenden Stacheln der Reizstelle zu. Auch bei schwacher chemischer Reizung wird dieser Reflex ausgeführt, wird dagegen ein stärkerer chemischer Reiz, z. B. eine konzentriertere Ammoniaklösung genommen, so neigen sich die Stacheln von der Reizstelle fort. v. Uexküll bezeichnet diese beiden einander entgegengesetzten Stachelreflexe als schwache und starke Form des Reflexes. Bethe spricht von einer Reflexumkehr.

Die Reflexumkehr wird auch von den Pedizellarien der Seeigel gezeigt. Es sind dies kleine, zangenartige Gebilde, welche von v. Uexküll nach ihrer Funktion als Gift-, Klapp-, Beiß- und Putzzangen bezeichnet werden.

Eine solche Reflexumkehr finden wir auch bei den Wirbeltieren. Reizen wir, wie Baglioni gezeigt hat, die Zehen der hinteren Extremität eines Rückenmarksfrosches, indem wir mit dem Finger einen leichten Druck gegen sie ausüben, so stemmt das Tier den Fuß gegen den Finger und die Zehen spreizen sich fächerartig. Kneifen wir die Zehen, so kommt es zu einem Beinanziehreflex. Das gleiche Verhalten hat Sherrington für den Rückenmarkshund beschrieben. Wird ein leichter Druck auf die Pfotenhaut der hinteren Extremität ausgeführt, so erfolgt ein Streckreflex; der Hund stemmt seine Pfote gegen die drückende Hand. Wird dagegen die Pfote stark gereizt, wird sie an der gleichen Stelle mit einer Nadel gestochen, so erfolgt ein Beugereflex; das Bein wird an den Körper angezogen. Baglioni ist geneigt, die sämtlichen Reflexe des Tierreiches in zwei Kategorien zu teilen, in solche, welche auf schwache, adäquate Reize eintreten und zu Bewegungen führen, welche den Reizen angepaßt sind, und in solche, welche durch starke oder inadäquate Reize hervorgerufen werden und zu heftigen Abwehr- und Fluchtbewegungen Anlaß geben.

Eine Reflexumkehr tritt, wie Sherrington gezeigt hat, auch bei Strychninvergiftung ein. Reizung einer bestimmten Hautstelle oder eines sensiblen Nerven, welche am nicht vergifteten Tier Hemmung eines Muskels veranlaßt, ruft bei schwacher Strychninvergiftung, die Kontraktion des

Muskels hervor. Doch scheint auch hier die Intensität der Erregung für den Eintritt der Reflexumkehr bestimmend zu sein, denn man kann eine solche Umkehr von Hemmung in Erregung allein durch Steigerung der Reizintensität hervorrufen. Am Rückenmarksfrosch ergibt die schwache Reizung der siebenten sensiblen Wurzel eine Hemmung der Beugemuskeln des Knies, starke Reizung bringt sie zur Kontraktion. In bezug auf das Strychnin wissen wir, daß durch seine stark erregbarkeitssteigernde Wirkung selbst schwache Reizungen sehr stark wirken.

Für die bisher beschriebenen Arten der Reflexumkehr war die Reizintensität bezw. die Erregungsintensität maßgebend. Die Reflexumkehr hängt jedoch auch von dem Zustand des Nervensystems ab.

Wenn wir einem hungrigen Hund Futter vorhalten, so beginnt sein Speichel zu fließen, ist aber der Hund vorher gefüttert worden, so ruft das Zeigen neuen Futters keine Speichelsekretion hervor Für solche Versuche eignen sich in besonderem Maße die nach Pawlow operierten Hunde. bei welchen die Ausführungsgänge wichtiger Verdauungsdrüsen nach außen geleitet worden sind, und die Menge und die Art ihres Sekretes leicht bestimmt werden kann. Eine entsprechende Reflexumkehr hat Baglioni an den Tintenschnecken beschrieben. Sind dieselben hungrig, so ergreifen sie gierig kleine Krebse, die ihnen zugeworfen werden, sind sie gesättigt, so werden sie durch die Anwesenheit von Beutetieren nicht in ihrer Ruhe gestört. Baglioni spricht von einer „Stimmung" der Nervenzentren, welche den Ausfall dieses Reflexes beherrscht.

Wir können ferner Reflexumkehr auch bei Erregbarkeitsherabsetzung des Nervensystems beobachten. Eine Reizung eines sensiblen Nerven des Froschrückenmarkes, welche am nicht ermüdeten Tier Hemmung eines Muskels hervorruft, veranlaßt am ermüdeten Tier eine Erregung.

Es liegt sehr nahe, die Lust- und Unlustgefühle, die Gefühlstöne, welche die Erregungsvorgänge in unserer Großhirnrinde begleiten, auf analoge Verhältnisse zurückzuführen. Wir wissen z. B., daß während der Verdauung die Eingeweidegefäße mächtig mit Blut gefüllt sind, während die Gehirngefäße kontrahiert sind. Bei dem großen Sauerstoffbedürfnis des Gehirns könnte die Verengerung der Gefäße schon eine Erregbarkeitsherabsetzung der Großhirnrinde, eine Umstimmung herbeiführen, welche begleitet ist von einer Unlust, nicht nur in bezug auf die Nahrungsaufnahme, sondern auch in Beziehung auf andere Reizbeantwortungen. Selbst die lustbetonteste Betätigung ruft, wenn sie zur Ermüdung führt, Unlustgefühle hervor.

Nach all diesen Erfahrungen werden wir sagen: Der Eintritt der Reflexumkehr ist abhängig 1. von der Reizintensität (bei der Strychninwirkung von der Erregungsintensität), 2. vom Zustand des Zentralnervensystems.

Die Reizintensität könnte nun insofern eine Rolle spielen, als bei Anwendung stärkerer Reize andere Sinnesorgane der Haut getroffen werden, welche die Erregung durch andere Sinnesnerven zu anderen Nervenzellen hinleiten. Schon v. Uexküll hat bei Beschreibung seiner Seeigelversuche die Annahme ausgesprochen, daß hier zwei voneinander getrennte Nervennetze bestehen, welche durch verschieden starke Reize in Erregung versetzt werden. Bethe weist dagegen darauf hin, daß diese Annahme eine Kompliziertheit des anatomischen Aufbaues voraussetzen würde, welche nicht ganz berechtigt erscheint.

Wir wissen durch zahlreiche Versuche am Menschen, daß sich in der Haut gesonderte Sinnesorgane für Wärme, Kälte, Druck und Schmerzempfindungen befinden, deren Erregung für die Reflexumkehr verantwortlich gemacht werden könnte. Es ist sehr einleuchtend, daß die freien Enden der sensiblen Nerven besonders zur Vermittlung der Schmerzempfindung geeignet sind, dies ist besonders in der Hornhaut unseres Auges der Fall, aber nach eigenen Beobachtungen kann ich sagen, daß bei vorsichtiger Reizung der Hornhaut auch Tastempfindungen wahrgenommen werden, während es andererseits sehr wahrscheinlich ist, daß bei intensiver Reizung der Druck- und Temperaturpunkte gleichfalls Schmerzempfindungen entstehen. Es erscheint daher nicht berechtigt, die Reflexumkehr nur auf die Erregung anderer Bahnen zurückzuführen, zumal ja bei schmerzhafter Reizung sämtliche Sinnesorgane der Haut erregt werden, sondern es liegt in Anbetracht der oben angeführten Tatsachen näher, die Reflexumkehr in erster Linie zur Intensität des Reizes und zum Zustand des Nervensystems in Beziehung zu setzen.

5. **Reflexgesetze.** Die Gesetzmäßigkeiten, welche der Ausbreitung der Erregungen durch die große Zahl von Nervenzellen des Nervensystems zugrunde liegen, sind zuerst von Pflüger untersucht worden. Pflüger ist auf Grund seiner Erfahrungen zur Aufstellung von fünf Reflexgesetzen gekommen. Die Richtigkeit dieser Gesetze wird jedoch heute bestritten. Es kommt dies daher, daß Pflüger eigentlich nur das Auftreten von krampfartigen Reflexen studiert hat, während seine Beobachtungen die durch schwächere und adäquate Reize

hervorgerufenen Reflexe, die ja gerade im Reflexleben der Tiere eine besonders wichtige Rolle spielen, außer acht gelassen haben. Nach Pflüger hat sich insbesondere Sherrington mit dem Studium der Reflexgesetze an Wirbeltieren beschäftigt, seine Versuche haben ihn zur Aufstellung von 5 Gesetzen geführt, die für die kurzen Reflexe dieser Tiere Geltung haben. Diese Gesetze seien im folgenden angeführt.

1. Die Beziehungen zwischen sensiblen und motorischen Nervenwurzeln des Rückenmarks sind abhängig von ihren räumlichen Beziehungen in den Rückenmarkssegmenten.

2. Für jede sensible Rückenmarkswurzel besteht in unmittelbarer Nachbarschaft eine motorische Wurzel, welche von den sensiblen Fasern am leichtesten und am stärksten erregt wird.

3. Es zeigen sich bei Reizung einer sensiblen Nervenwurzel Verschiedenheiten in der Erregung der Muskeln, welche von den motorischen Wurzeln des gleichen Rückenmarkssegments erregt werden. Bei Reizung der einen Wurzel werden leichter die Beuger der gleichen Seite und die Streckmuskeln der anderen Seite erregt, bei Reizung einer anderen leichter die Streckmuskeln der gleichen und die Beuger der anderen Seite (antagonistische Innervation).

4. Motorische Nervenzellen, welche bei einem Reflexakt in Aktion treten, innervieren nur synergistische und nie antagonistische Muskeln.

5. Rückenmarksreflexe, welche durch irgendeinen Rückenmarksabschnitt vermittelt werden, zeigen eine große Gleichmäßigkeit ihres Ablaufes ungeachtet der verschiedenen Lage der Punkte, von welchen die Reflexe ausgelöst werden können.

In Anbetracht dieser für die kurzen Reflexe der Wirbeltiere geltenden Gesetzmäßigkeiten tritt uns die Frage entgegen, ob ähnliche Gesetze auch für die ausgedehnten Reflexe des Wirbeltierkörpers und für das Reflexleben der wirbellosen Tiere Geltung haben. Wie wir im folgenden sehen werden, kommen für die Ausbreitung der Erregung noch eine Reihe weitere Momente in Betracht.

Der Ausbreitung der Reflexe über größere Körpergebiete dienen vor allem die langen Nervenbahnen, die, wie viele Erfahrungen zeigen, genau wie die kurzen Reflexwege zueinander in synergistischer und antagonistischer Beziehung stehen.

Ein weiterer Faktor der Ausbreitung der Erregung ist in der Wiedererregung der sensiblen Fasern der tätigen Organe durch die Tätigkeit des Organes gegeben. Wir haben bei Besprechung der peristaltischen Bewegungen gehört, daß sich auf Grund der Wiedererregung eine Reflexerregung über den ganzen Körper ausbreiten kann. Jeder in Erregung befindliche Teil des Körpers regt den benachbarten auf reflektorischem Wege zur Tätigkeit an und so geht es fort, bis die Erregung über den ganzen Tierkörper abgelaufen ist.

Die Ausbreitung der Erregung hängt ferner ab von der Intensität, Qualität und Dauer des Reizes.

Entferntere Abschnitte des Körpers sind miteinander durch Reflexbögen verbunden, welche häufig aus mehreren hintereinander geschalteten Neuronen bestehen. Wir haben oben gehört, daß das Dekrement einer Erregungswelle um so stärker ist, je mehr Nervenzellen von ihr durchlaufen werden müssen. Bei Anwendung stärkerer Reize kann man auch solche Reflexbögen noch erregen, während schwache Reize unwirksam erscheinen.

Die Ausbreitung der Erregung hängt in vielen Fällen auch von der Reizqualität ab. Gewisse Reflexbögen sprechen leichter auf eine bestimmte Reizqualität an, in diesen Fällen ist die Ausbreitung des Reflexes von der Qualität des Reizes abhängig. Auf ein wichtiges hierhergehörendes Beispiel hat Baglioni aufmerksam gemacht. Der mit Strychnin vergiftete Frosch reagiert auf mechanischen oder elektrischen Reiz mit reflektorischer Erregung fast aller Körpermuskeln, chemische Reizung der Haut erscheint dagegen unwirksam.

Auch die Reizdauer beeinflußt die Ausbreitung der Reflexerregung. Es hängt dies mit der ausgebildeten Fähigkeit des Nervensystems zusammen, Reize zu summieren. Ein kurzdauernder Reiz hat keinen oder nur einen schwachen lokalen Reflex zur Folge, während der gleiche Reiz bei längerer Dauer ausgedehnte Reflexe hervorrufen kann.

Schließlich hängt die Ausbreitung der Erregung ab vom Zustand des Nervensystems. Ist die Erregbarkeit hoch, wie dies bei wirklich oder auch nur scheinbar gesteigerter Erregbarkeit (Bahnung) der Fall ist, so breitet sich die gleiche Erregung über größere Gebiete des Körpers aus, ist dagegen die Erregbarkeit gering, so erfahren die Erregungen ein so starkes Dekrement, daß sie entweder gar keine oder nur schwache, lokale Reflexe hervorrufen.

An Hand dieser Erfahrungen können wir kurz die Bedingungen zusammenfassen, welche die Ausbreitung der Erregungen im Nervensystem beherrschen. Es sind folgende:

1. Die anatomischen Beziehungen, das sind synergistische und antagonistische Beziehungen der Reflexbögen, die gemeinsamen Strecken der Reflexbögen. Die Anzahl und die funktionellen Eigenschaften der im Reflexbogen hintereinander geschalteten Neurone.

2. Intensität, Qualität und Dauer der Reizung.
3. Die Wiedererregung in der Peripherie.
4. Der Zustand des Nervensystems.

Literatur. **A. Bethe,** *Allgemeine Anatomie und Physiologie des Nervensystems. Leipzig 1903.* — **C. S. Sherrington,** *The integrative action of the nervous system. London 1906.* — **M. Verworn,** *Die einfachsten Reflexwege im Rückenmark. Berichte der Deutschen physiologischen Gesellschaft. Würzburg 1909.* — **F. W. Fröhlich,** *Beiträge zur Analyse der Reflexfunktion des Rückenmarks. Mit besonderer Berücksichtigung von Tonus, Bahnung und Hemmung. Zeitschrift für allgem. Physiologie, Bd. 9, 1909.* — **W. Biedermann,** *Beiträge zur allgemeinen Nerven- und Muskelphysiologie. XVII. Ueber die elektrische Erregung des Schließmuskels von Anodonta. 1884. III. Abt.* — **J. v. Uexküll,** *Ueber Reflexe bei Seeigeln. Zeitschrift für Biologie, Bd. 34, 1896. Die Physiologie der Pedicellarien. Zeitschrift für Biologie, Bd. 37, 1899. Die Physiologie des Seeigelstachels. Zeitschrift für Biologie, Bd. 39, 1900.* — **P. v. Grützner** (**J. Scholt**), *Ein Beitrag zur elektrischen Reizung des Muskels von seinem Nerven aus. Pflügers Archiv, Bd. 48, 1891.* — **S. Baglioni,** *Physiologische Differenzierung verschiedener Mechanismen des Rückenmarks. Archiv für Physiologie 1900, Supplement.* — **F. W. Fröhlich,** *Experimentelle Studien am Nervensystem der Mollusken 13. Zeitschrift für allgemeine Physiologie, Bd. 11, 1910.* — **B. Friedländer,** *Beiträge zur Physiologie des Zentralnervensystems und des Bewegungsmechanismus der Regenwürmer. Pflügers Archiv, Bd. 58, 1899.* — **W. Biedermann,** *Studien zur vergleichenden Physiologie der peristaltischen Bewegungen. I. Die peristaltische Bewegung der Würmer und der Tonus glatter Muskeln. Pflügers Archiv, Bd. 102, 1909.* — **E. Hering und J. Breuer,** *Die Selbststeuerung der Atmung durch den Nervus vagus. Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften in Wien, Bd. 57, 1868.* — **S. Schulgin,** *Ueber die Selbststeuerung der Atmung durch die Nervi vagi. Zeitschrift für allgemeine Physiologie, Bd. 10, 1910.* — **R. Magnus,** *Zur Regelung der Bewegungen durch das Zentralnervensystem. III., IV. Pflügers Archiv, Bd. 134, 1910.* — **S. Baglioni,** *Contributi alla fisiologia sperimentale dei movimenti riflessi. Archivio di Fisiologia, I, 1904.* — **E. Pflüger,** *Die sensorischen Funktionen des Rückenmarks, Berlin 1853.* — **S. Baglioni,** *Zur Analyse der Reflexfunktion, Wiesbaden 1907.*

F. W. Fröhlich.

Regel

Eduars August.

Geboren am 13. August 1815 in Gotha. Er widmete sich dem Gärtnerberufe und wurde, nachdem er in den Botanischen Gärten zu Göttingen, Bonn und Berlin tätig gewesen und sich hierbei dem systematischen Studium der Gartenpflanzen gewidmet hatte, im Jahre 1842 Obergärtner des Botanischen Gartens in Zürich, der unter ihm einen hohen Aufschwung nahm, und 1855 Direktor des Botanischen Gartens zu St. Petersburg. Als solcher wirkte er, für die Vergrößerung und Ausgestaltung des Gartens sowie für die Ausbreitung des Obst- und Gartenbaues in Rußland mit hohem Erfolge bemüht, bis zu seinem am 27. April 1892 erfolgten Tode. Er ist der Verfasser einer Anzahl floristischer, systematischer und auf den Gartenbau bezüglicher Arbeiten und der Begründer einer der bedeutendsten gärtnerischen Zeitungen, der „Gartenflora", deren Redaktion er von 1852 bis 1884 leitete.

Literatur. **L. Wittmack** *in Gartenflora, 41. Jahrg. (1892), S. 261 bis 269, dort auch ein Schriftenverzeichnis.*

W. Ruhland.

Regelation.

Der Ausdruck bezeichnet den Vorgang, daß Eis bei weniger als 0° unter erhöhtem Druck in ein Gemenge von Wasser und Eis übergeht, beim Verschwinden des Ueberdruckes aber wieder völlig gefriert (Helmholtz). Der Vorgang spielt bei der Bewegung der Gletscher eine Rolle (vgl. den Artikel „Eis").

Regeneration.

In der anorganischen Natur: a) bei Kristallen. Sehr weiche Kristalle, z. B des Jodsilbers, vermögen sich nach einer Verletzung in sich selbst wieder zu der alten Form zu ergänzen, andere verletzte Kristalle vermögen wieder auszuheilen, wenn man sie in ihre konzentrierte Lösung desselben Lösungsmittels bringt, aus dem sie entstanden sind. b) Bei Gesteinen: Hier bedeutet der Ausdruck die Verkittung von losen Gesteinsbruchstücken durch anderes Material zu einem festen Gestein, ist also etwa gleichbedeutend mit der Bezeichnung „erhärtete klastische Gesteine". c) Bei Gletschern: Analog wie bei den Gesteinen die Wiederverkittung des durch einen Gletscherfall oder -bruch in einzelne Blöcke zerbrochenen Eises (vgl. die Artikel „Kristallisation", „Mineral- und Gesteinsbildung auf wässerigem Wege", „Gesteinseinteilung", „Eis").

Regeneration.

1. Regeneration von Kristallen. 2. Regeneration bei Pflanzen. 3. Regeneration an Zellen und einzelligen Tieren. 4. Verbreitung der Regeneration, Geschichtliches. 5. Verschiedene Formen und Vollzug der Regeneration. 6. Herkunft des Regenerationsmaterials, Regeneration und Entwickelung. 7. Ausbildung und Wachstum des Regenerats, Restitution und Regulation (Umgestaltungs-Rück- und Umdifferenzierungsvorgänge usw.). 8. Reduktionsvorgänge. 9. Regeneration kleinster Teilstücke, sowie diejenige durch Dissoziation und Reunition. 10. Verschiedene Regenerationsfähigkeit einzelner Körperteile, Wiederholung und Energie der Regeneration. 11. Unvollständige und Superregenerate, Doppel- und Mehrfachbildungen. 12. Regeneration und Polarität des Körpers, Umkehrung der Polarität, Heteromorphosen. 13. Atavismus in der Regeneration. 14. Regeneration und Fortpflanzung, Selbstzerstückelung (Autotomie), die Regeneration als Anpassungserscheinung. 15. Faktoren der Regeneration.

Unter Regeneration versteht man die Erscheinung, daß verloren gegangene Teile eines Organismus von ihm ersetzt, neu gebildet werden können. Zum Verlust einzelner Körperteile kann es im Lauf des Lebens durch irgendwelche äußere Einflüsse leicht kommen. Es entstehen dann Wunden am Körper, von denen die Neubildungen ausgehen. Die Erscheinung ist weit verbreitet und findet sich bei Pflanzen wie bei Tieren, wenn auch die Regeneration im eigentlichen Sinne mehr den letzteren als den ersteren zukommt. Zwar besitzen die Pflanzen in noch viel weitgehenderem Maße als die Tiere die Fähigkeit, verloren gegangene Teile zu ersetzen, aber der Vorgang ist bei ihnen insofern ein anderer, als die Neubildung gewöhnlich nicht von der Wundfläche aus erfolgt, sondern der Ersatz der verloren gegangenen Teile durch entsprechende Weiterentwickelung von Nebensprossen oder Adventivknospen bewirkt wird. Neuerdings hat man auch von einer Regeneration bei Kristallen gesprochen und die betreffenden Erscheinungen mit denjenigen bei den Organismen verglichen bezw. zu ihrer Erklärung zu benützen gesucht. Aus diesem Grunde sollen sie auch hier kurz berührt werden, ehe auf die Regenerationserscheinungen der Organismen eingegangen wird. Von diesen sollen die der Pflanzen des Vergleichs wegen hier ebenfalls nur kurz berührt werden, während das Hauptgewicht auf die Regenerationsvorgänge am tierischen Körper zu legen ist.

1. Regeneration an Kristallen. Wie Kristalle, in eine Lösung ihrer Substanz gebracht, in einer dem Kristallisationsgesetz entsprechenden Weise an Umfang zunehmen, so geschieht dies auch mit solchen, die nur an einzelnen Stellen ihrer Oberfläche verletzt sind. Die Ablagerung der neuen Teile erfolgt sowohl an den verletzten, wie an den unverletzten Stellen, also über die ganze Oberfläche des Kristalls. Bei einer besonderen Versuchsanordnung gelingt es jedoch, die Neubildung auf die Bruchstellen zu beschränken und dadurch eine größere Uebereinstimmung mit der Wundheilung und dem Regenerationsvorgang bei den Organismen zu erzielen.

Nachdem in neuerer Zeit besonders Rauber auf gewisse Uebereinstimmungen in den Gestaltungs- und Bildungsverhältnissen der Kristalle und Organismen hingewiesen hatte und das Problem von verschiedenen anderen Seiten aufgenommen wurde (Barfurth, Driesch, O. Lehmann, Morgan, Rhumbler, Roux u. a.) stellte Przibram einen für die Analogie mit dem Regenerationsvorgang recht charakteristischen Versuch an. Wenn er künstlich verletzte Kaliumalaunkristalle in eine (durch Oelverschluß) vor Verdunsten geschützte Kalialaun- oder Chromalaunlösung brachte, so fand eine Wiederherstellung der Octaederform und zwar ohne Gewichtszunahme des Kristalls statt. An anderen Stellen des Kristalls war eine Abrundung der Ecken und das Auftreten von Lösungsdreiecken zu bemerken (Fig. 1 A und B); es hatte sich also in der vor Verdunsten geschützten Mutterlauge eine Ablösung von Teilchen an anderen Stellen des Kristalls zugunsten der Ablagerung an der Bruchstelle vollzogen. Ganz ähnlich wie beim Regenerationsvorgang der Organismen hatte somit eine Ausheilung der Wundstelle und ein Ersatz verloren gegangener Teile auf Kosten des übrigen (Kristall-) Körpers stattgefunden, ohne daß eine Ablagerung neuer Substanz an der übrigen Oberfläche des Kristalls erfolgte.

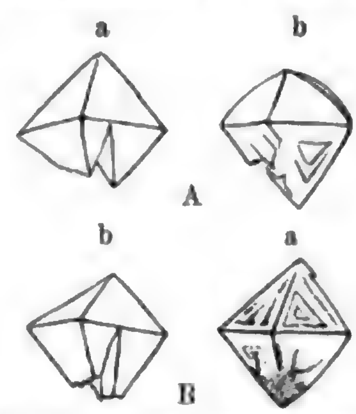


Fig. 1. Formregulation von Kalialaunkristallen in vor Verdunstung geschützter Kalialaunlösung (A) und Chromalaunlösung (B). Nach Przibram.

Einfacher noch kann sich der Formausgleich oder die Wiederherstellung der Gestalt nach Substanzverlusten bei den von O. Lehmann so eingehend studierten flüssigen

Kristallen vollziehen, indem bei ihnen die Möglichkeit zu einer bloßen Umlagerung der Teile und damit zu einer Umgestaltung einzelner Partien oder des ganzen Kristallkörpers gegeben ist. Diese Umlagerung der Teilchen zur Hervorbringung äußerer Formveränderungen findet ihre Analogien in gewissen Vorgängen, welche wir bei der Regeneration der Organismen, zumal der Tiere noch kennen lernen werden; ebenso ist die Fähigkeit flüssiger Kristalle, sich zu einem mehr oder weniger einheitlichen Gebilde zu vereinigen mit gewissen Verschmelzungsvorgängen von Organismen vergleichbar. Bei den flüssigen Kristallen liegt der Vergleich mit den bei den Organismen obwaltenden Bildungsvorgängen insofern besonders nahe, als Ausgleich und Neugestaltung (wie beim Organismus) aus dem eigenen Körper heraus erfolgen. Bei den Organismen geschieht der Ersatz durch andersartige Verwendung, Mobilmachung oder Neubildung von Teilen, bei den starren Kristallen allerdings erfolgt er durch Auflagerung neuer Teilchen von außen her. Werden Teile seines eigenen Körpers dabei aufgebraucht, wie es vorher geschildert wurde, so gelangen sie doch erst durch Vermittlung der umgebenden Lösung an die Wundstelle. Bei den flüssigen Kristallen allerdings könnte sich dies anders und mehr wie bei den Organismen verhalten. Jedenfalls aber erscheint der Kristall wie der Organismus als ein in sich geschlossenes System, dessen Gleichgewicht durch Entfernen einzelner Teile solange gestört erscheint, bis die verlorenen Teile wieder ersetzt sind. Den Vergleich zwischen den Gestaltungsprozessen der Kristalle und Organismen weiter zu führen, wie es von seiten der obengenannten Autoren geschieht, ist hier nicht angängig, vielmehr sei in dieser Beziehung auf die angeführten Arbeiten und auf Barfurths fortgesetzte Berichte verwiesen.

2. Regeneration bei Pflanzen. Wie schon eingangs erwähnt wurde, handelt es sich bei dem Ersatz verloren gegangener Teile am Pflanzenkörper seltener um echte Regeneration, d. h. um die Neubildung der verlorenen Partien von der Wundfläche aus, sondern vielmehr um die Ausbildung bereits vorhandener Sprosse in anderer Richtung oder um die Entwickelung von Adventivknospen, wodurch der gänzliche oder teilweise Ersatz ermöglicht wird. Daß die Pflanzen in hohem Maße die Fähigkeit besitzen, verloren gegangene Teile neu zu bilden, ist eine allgemein bekannte Tatsache. Abgebrochene Zweige und andere Sproßteile oder Wurzeln werden durch Neubildungen ersetzt; vollständig von Zweigen entblößte Stämme, Bäume und Sträucher, die dicht über dem Erdboden abgeschnitten wurden, treiben aus Stammresten und Wurzelstöcken neue Sprosse. Dies ist dadurch möglich, daß an den übrig gebliebenen Teilen zahlreiche schlummernde Knospen vorhanden sind, die für gewöhnlich nicht zur Entwickelung gelangen, aber dann in Aktion treten, wenn die schon ausgebildeten Sprosse der Pflanze aus irgendeinem Grunde vernichtet wurden. Diese Vegetationspunkte, aus denen die Neubildungen entstehen, sind häufig sehr klein und schwer auffindbar, zumal sie häufig nur aus ganz unscheinbaren Zellenkomplexen oder aus wenigen Zellen bestehen, ja sogar auf eine einzige Zelle zurückgeführt werden können. Die Vermutung liegt nahe, daß es sich dabei um indifferente Zellen handelt, welche von vornherein in bildungsfähigem Zustand blieben, aber andererseits wird auch bereits differenzierten Zellen, z. B. denjenigen der Epidermis von Blättern, die Fähigkeit zugeschrieben, durch Teilung neue Vegetationspunkte liefern und dadurch zur Bildung neuer Sprosse Anlaß geben zu können.

Einige Beispiele dürften das Mitgeteilte noch besser erläutern. So ist es allgemein bekannt, daß die Blätter der Begonien und mancher anderer Pflanzen an diesen selbst oder von ihnen abgelöst, Sprosse an verschiedenen Stellen ihrer Blattspreite, an den Rändern, am Blattgrund, Stiel usf. erzeugen können. Die dunklen Punkte an dem in Figur 2 abgebildeten Blatt einer Cardamine

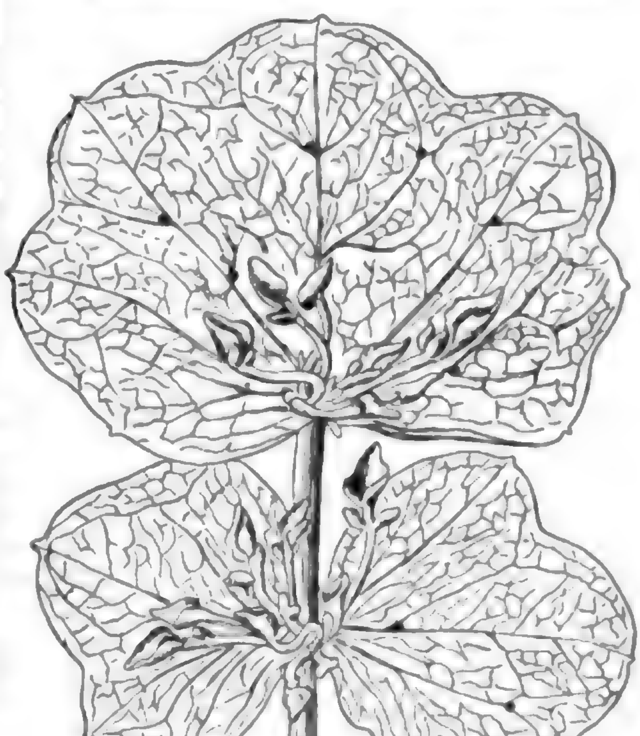


Fig. 2. Blatt von Cardamine pratensis mit Vegetationspunkten und Adventivsprossen. Nach Goebel.

deuten die Anlagen von Adventivsprossen an, von denen eine Anzahl weiter unten am Grunde bereits zur Ausbildung gelangt ist. Am Grunde der Blattspreite und am Blatt-

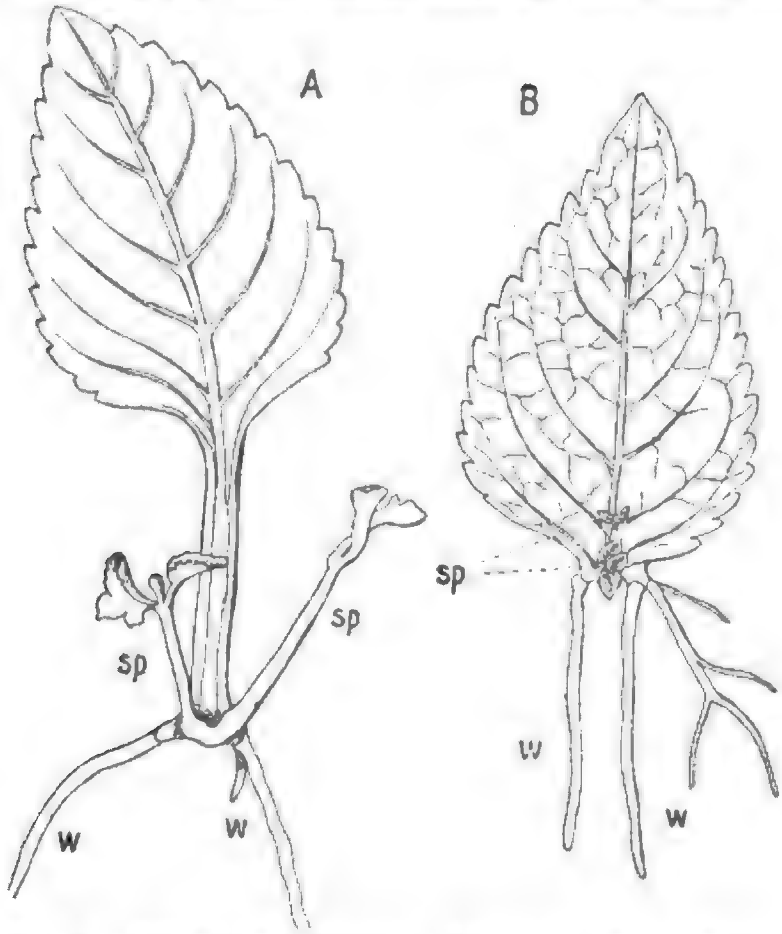


Fig. 3. Blätter von Torenia Fournieri mit Adventivsprossen (sp) und Wurzeln (w). Nach Goebel.

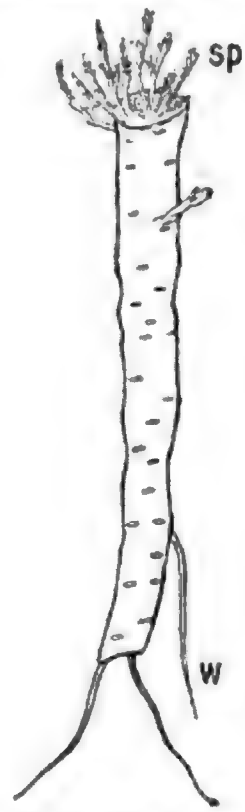


Fig. 5. Stück einer Wurzel von Populus dilatata mit Callus- und Sproßbildung (sp) an der oberen Wundfläche, unten Wurzeln (w). Nach A. Vöchting.



Fig. 4. Blätter von Torenia asiatica mit Adventivsprossen und einem größeren Blütensproß. Nach H. Winkler.

stiel der Blätter von Torenia, einer Scrophulariacee (Fig. 3), haben sich Sprosse und Wurzeln entwickelt, welche bei den Blättern einer anderen Torenia (Fig. 4) schon zu einer weiteren Ausbildung gelangten, so daß bereits ein blütentragender Sproß an der Blattspreite vorhanden ist (Fig. 4 B).

An abgeschnittenen Pflanzenteilen (Zweigen, Ranken, Wurzeln usw.) können die neuen Sprosse auch an der Wundfläche bezw. aus dem sie bedeckenden neugebildeten Gewebe (Callus) hervorgehen. Dieser Vorgang würde schon eher der echten Regeneration am tierischen Körper gleichen, wenn nicht die betreffenden Sprosse wesentlich schmäler als die Wundfläche wären und infolgedessen eine ganze Anzahl an ihr Platz finden und auch wirklich aus ihr hervorgehen könnten (Fig. 5). Und doch finden sich auch bei der Pflanze Vorgänge, welche sich im Vergleich mit denjenigen am Tierkörper als echte Regeneration bezeichnen lassen. Man hat sie besonders durch Spaltung peripherer Partien, an Zweig- und Blattspitzen, wie Wurzelenden hervorgerufen.

Ein bekanntes Beispiel dafür bildet die köpfchentragende Stammspitze der Sonnenrose, welche in früherem Stadium der Länge nach gespalten an beiden Hälften eine Neubildung der verlorengegangenen Partien über die ganze Wundfläche hin erkennen läßt. Allerdings wird in Verbindung damit sicher eine Neubildung mancher Teile, wie der Hüllblätter und Blüten, durch Adventivknospen erfolgen, so daß beiderlei Bildungsvorgänge ineinander greifen, aber immerhin kann hier von einer Regeneration im Sinne des Tierkörpers gesprochen werden. Noch mehr gilt dies für die Wurzelspitzen und gewisse Neubildungen an Blättern.

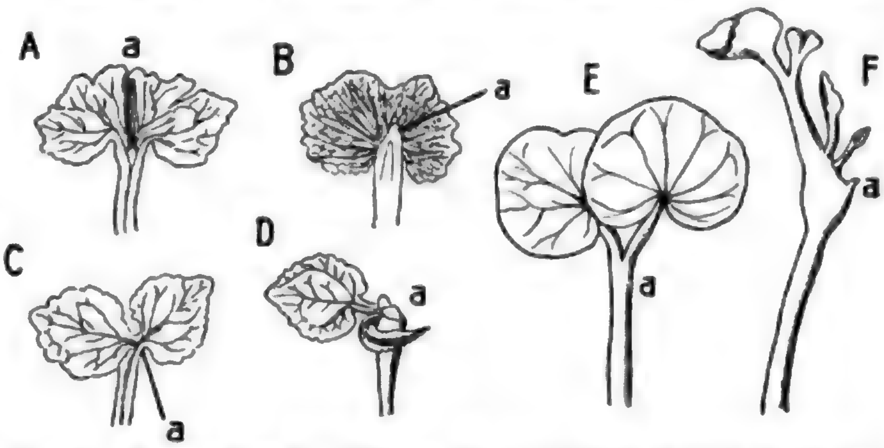


Fig. 6. **Ersatz des Keimblattes bei Cyclamen persicum in verschiedenen Ausbildungsstufen. Nach Goebel.**

Beim Abschneiden oder Spalten von Wurzelspitzen erfolgt an der Wundfläche durch Streckung und Teilung der Zellen ein Wundverschluß (Callusbildung) und darunter durch weitere Zellteilungen eine Neubildung und Ergänzung der betreffenden Gewebe an den verletzten Partien, so daß der ganze Vorgang in der Tat unter dem Bilde einer wirklichen Regeneration verläuft. In die Augen fallender ist dies noch bei Blättern. Im allgemeinen werden allerdings abgerissene Teile von Blättern nicht ersetzt, jedoch gibt es Ausnahmen von dieser Regel. Einen besonders bekannt gewordenen Fall von Regeneration zeigt das einem gestielten Laubblatt gleichende erste Keimblatt der Cyclamen, nach dessen Verlust im Zusammenhang mit der alten Blattspreite Neubildungen auftreten (Fig. 6, A bis C), welche bis zur Ausbildung gestielter Blättchen (Fig. 6, C bis F) oder unregelmäßigeren Blattbildungen führen können. Interessant wegen des Vergleichs mit den auf experimentellem Wege erzielten Doppelbildungen bei Tieren sind die von Goebel und Figdor ausgeführten Versuche an Farnblättern, welche sich im Gegensatz zu den Blättern höherer Pflanzen durch ihr weitgehendes Spitzenwachstum für solche Versuche besonders eignen. Wurden solche Blätter (von Polypodium oder Scolopendrium) an der Spitze gespalten, so ergänzten sich die beiden Hälften von der Wundfläche aus unter Beteiligung der betreffenden Gewebe, ähnlich wie bei der Regeneration von Teilen des Tierkörpers und es bildete sich eine doppelte Spitze am Blatt aus (Fig. 7 und 8). Aehnliche Vorgänge des Ersatzes verloren gegangener Teile auf dem Wege der Regeneration sind noch von anderen höheren oder niederstehenden Pflanzen bekannt geworden, es sei nur an die Restitutionserscheinungen an den Blättern der Gesneriaceen (Pischinger, Figdor), sowie an diejenigen bei verschiedenen Algen (Figdor, Miehe u. a.) erinnert. Vergleichspunkte mit den in Verbindung mit Regenerationsvorgängen am tierischen Körper zu beobachtenden Erscheinungen gibt es außerdem zur Genüge bei der Umformung und Verlagerung gewisser Teile, den Polaritäts- und anderen



Fig. 7. An der Spitze gespaltenes und an beiden Spalthälften regeneriertes Blatt von Polypodium heracleum. Nach Goebel.

Erscheinungen, auf welche bei Behandlung der Regulations- und verwandter Vorgänge am Tierkörper noch einzugehen sein wird. Außerdem sei auf die Darstellungen von Goebel, Vöchting, Klebs, Winkler, Figdor u. a. verwiesen.

3. Regeneration an Zellen und einzelligen Tieren. Wie jede Lebenstätigkeit, so ist auch die als Regeneration bezeichnete Erscheinung am Körper lebender Organismen in letzter Instanz an die Zellen gebunden. Ihre Tätigkeit ist es, welche in verschiedener Weise, je nach den Organisationsverhältnissen der betreffenden Tiere oder Pflanzen das Zustandekommen der Regeneration ermöglicht und den Verlauf des Vorgangs bestimmt. Auch die Zelle selbst ist regenerationsfähig. An den einzelnen Zellen des Körpers mehrzelliger Pflanzen und Tiere das Vorhandensein einer Regenerationsfähigkeit festzustellen, ist für gewöhnlich unausführbar, weil sie meistens dafür zu wenig umfangreich sind und im festen Verband der Gewebe liegen. Trotzdem lassen sich bei manchen pflanzlichen Zellen, die eine gewisse Unabhängigkeit gegen ihre Umgebung bewahren, Regenerationsversuche ausführen. Ein lehrreiches Beispiel dafür liefern die Brennhaare von Urtica dioica, bei denen nach Verlust der Spitze von der Wundstelle ausgehend, eine neue etwas dünnwandige und unregelmäßige Spitze gebildet wird (Fig. 9).

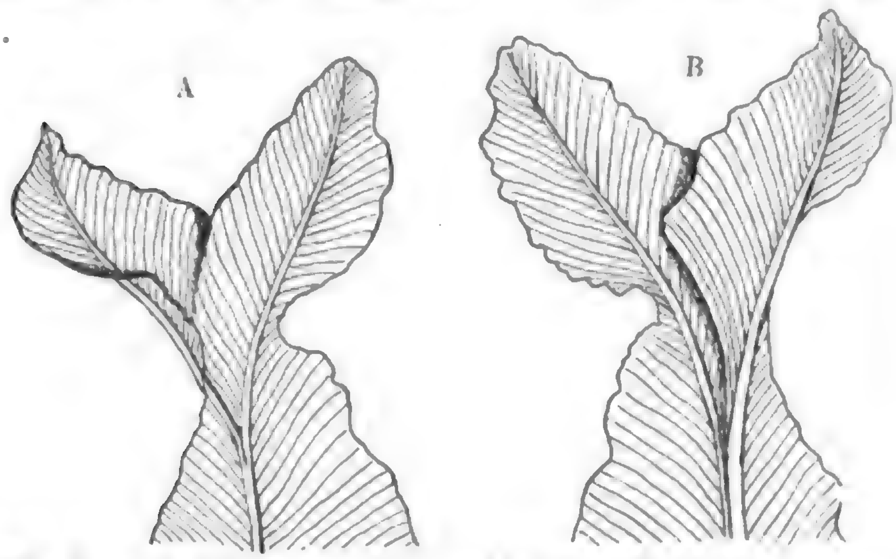


Fig. 8. An der Spitze gespaltenes und in beiden Spalthälften regeneriertes Blatt von Scolopendrium scolopendrium. Nach Figdor.



Fig. 9. Brennhaar von Urtica dioica mit abgebrochener und regenerierter Spitze. Nach E. Küster.

In ähnlicher Weise hat man nach Entfernung von Stücken der Zellmembran und des darunter liegenden Protoplasmakörpers bei niederen Pflanzen (Siphoneen und Phycomyceten) durch Schluß der Wunde und Neubildung der verlorenen Teile eine echte Regeneration beobachten können. Durch eine ganze Reihe von Versuchen, die ebenfalls an Zellen von Algen, sowie an Farnprothallien, Moosblättern, Blättern von Elodea, Zellen von Wurzelhaaaren, Pollenschläuchen usf. ausgeführt wurden, konnte die Neubildung der Zellmembran (nach deren Entfernung mittelst Plasmolyse) nachgewiesen werden (Schmitz, Klebs, Townsend u. a.). Diese Versuche sind auch deshalb von besonderem Interesse, weil sie einen Zusammenhang des Zellkerns mit dem Vollzug des Regenerationsprozesses erkennen lassen. Nach den Versuchen von Klebs und den genannten Autoren zeigte sich an den durch Plasmolyse (mit Zuckerlösung) von derZellmembran isoliertenPlasmakörpern, daß nur diejenigen von ihnen, welche im Besitz eines Zellkerns sind, eine neue Membran zu bilden vermögen, daß diese Fähigkeit aber denjenigen Stücken abgeht, welche des Zellkerns entbehren. Die Figuren 10 bis 12 erläutern diese Klebsschen Befunde in höchst instruktiver Weise und bedürfen weiter keiner Erläuterung. Bemerkenswert ist dabei, daß solche Zellenbruchstücke, welche zwar kernlos, aber durch einen Protoplasmafaden mit dem kernhaltigen Stück verbunden sind, infolge dieser noch bestehenden Verbindung die Fähigkeit zur Membranbildung bewahrten (Fig. 12 B). Wird jedoch diese an und für sich nur recht schwache Verbindung unterbrochen, so erlischt auch in einem solchen kernlosen Stück das Vermögen, die Membran wieder herzustellen. Es braucht nicht besonders bemerkt zu werden, daß beim Unterbleiben der Membranbildung die betreffenden Bruchstücke nicht dauernd lebensfähig sind, wenn sie

auch eine Zeitlang weiter vegetieren und einen Teil ihrer Lebensverrichtungen vollziehen, sogar in ihren Chromatophoren Stärke bilden können.

Die Ergebnisse der Versuche an Pflanzenzellen stehen in auffallender Uebereinstimmung mit den an einzelligen Tieren gewonnenen Resultaten. Daß die Protozoen

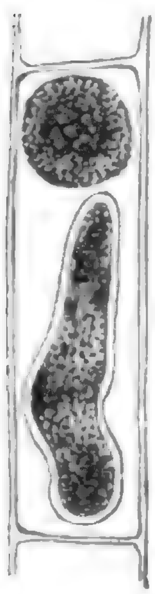


Fig. 10. Kernhaltiges, membranbildendes und kernloses, der Membran entbehrendes Stück einer Zelle eines Zygnemafadens nach Plasmolyse (in konzentrierter Zuckerlösung). Nach Klebs.

Regenerationsvermögen besitzen, weiß man schon recht lange, ja ihre Regenerationsfähigkeit kann sogar eine ziemlich weit-

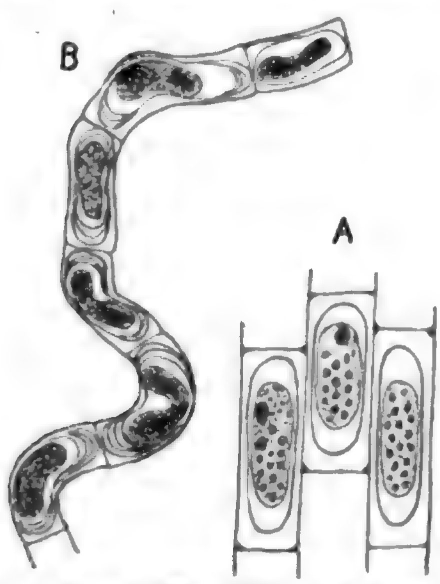


Fig. 11. A Neue Zellhautbildung in plasmolysierten Blättern von Elodea canadensis, B Bildung der mehrfach geschichteten neuen Zellhäute in einem plasmolysierten Zygnemafaden. Nach Klebs.

gehende sein. Ein beliebtes Objekt für derartige Versuche war der zu den heterotrichen Infusorien gehörige Stentor, das sogenannte Trompetentierchen (Fig. 13). Wenn man es etwa in der Mitte quer durchschneidet, bildet das Vorderstück ein neues Hinterende, das Hinterstück ein neues Vorderende mit dem dazu gehörigen, kompliziert gebauten Peristom (Mundfeld).

Aehnliche Regenerationsvorgänge wie bei der künstlichen finden auch bei der natürlichen Teilung, d. h. bei jenem Fortpflanzungs-

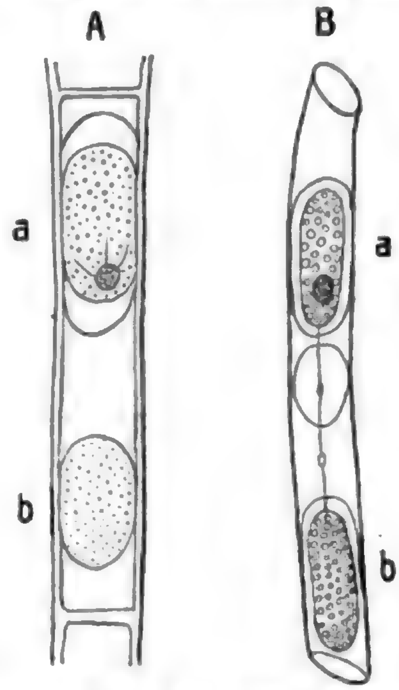


Fig. 12. A Zelle eines Kelchblatthaares von Gaillardia, B Protonemazelle nach Plasmolyse, mit kernhaltigen (a) und kernlosen Stücken (b). Nach Townsend.

vorgang der Protozoen statt, welcher zur Zerlegung des Körpers in zwei ungefähr gleich große Teilstücke führt (man vgl. hierzu den Artikel „Fortpflanzung"). Dabei muß in ganz ähnlicher Weise das vordere Individuum ein neues Hinterende, das hintere Individuum hingegen ein neues Vorderende zur Ausbildung bringen.

Auch das Zerlegen des Tieres in mehrere Teilstücke, wobei die Schnitte in recht verschiedener Richtung geführt werden können und die Stücke schließlich nur noch $^1/_{27}$, sogar bis $^1/_{64}$ des Körpervolumens ausmachen, führt zur Regeneration und mehr oder weniger vollständigen Herstellung dieser Teilstücke (Gruber, Lillie, Morgan). Die Figuren 13 und 14 dürften dies und die Ausführung der Versuche in anschaulicher Weise erläutern. Sie lassen auch erkennen, daß die Ergänzung zur Form des Stentors nicht nur in einer Neubildung von Teilen bestehen kann, sondern daß auch eine Umformung vorhandener Teile stattfinden muß. Solche Umgestaltung, Verlagerung und Umarbeitung von Körperpartien in Verbindung mit Regenerationsprozessen werden wir späterhin auch bei mehrzelligen Tieren in ähnlicher Weise wiederfinden, da ohne sie die Wiedererlangung der

definitiven Gestalt in vielen Fällen geradezu unausführbar wäre.

Aehnlich wie Stentor lassen sich auch andere Infusorien und Rhizopoden in Teilstücke zerlegen und zur Regeneration bringen. Notwendig ist dabei allerdings, daß

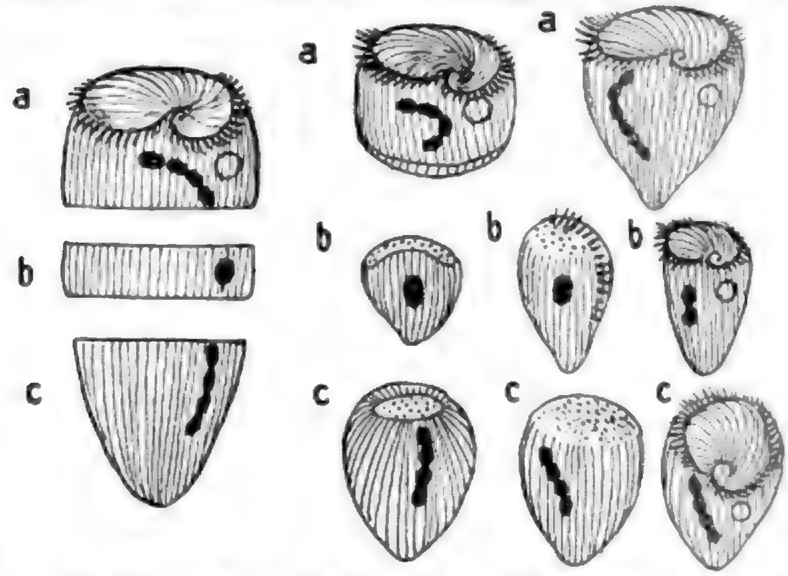


Fig. 13. Ergänzung der durch zwei quere Schnitte erzielten drei Teilstücke (a, b, c) eines Stentors. Nach A. Gruber.

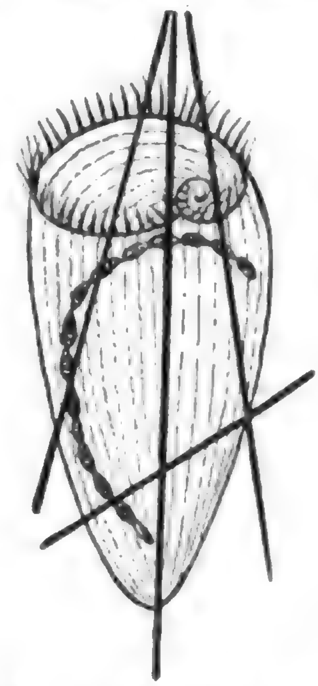


Fig. 14. Zerlegung eines Stentors in eine Anzahl meist kernhaltiger Teilstücke durch längs- und schräggerichtete Schnitte.

die Teilstücke im Besitz eines Kerns oder Kernteilstücks sind, welches sich zu einem vollständigen Zellkern zu ergänzen vermag. Kernlose Teilstücke leben zwar noch einige Zeit, nehmen wohl auch einen Anlauf zur Regeneration und verrichten gewisse Lebensfunktionen, wie es vorher von kernlosen

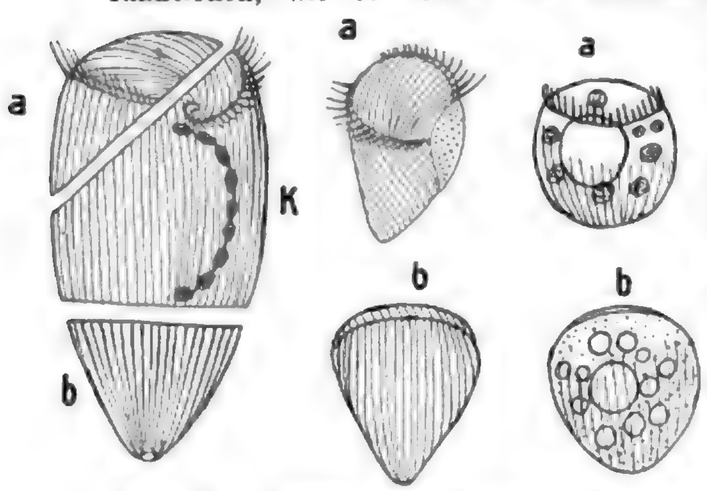


Fig. 15. Zerlegung eines Stentors in ein kernhaltiges (k) und zwei kernlose Stücke (a, b). Nach A. Gruber.

Bruchstücken der Pflanzenzellen erwähnt wurde, aber auf die Dauer sind sie weder regenerations- noch lebensfähig. Die kernlosen Teilstücke eines Stentors (Fig. 15a, b) runden sich zwar zunächst ab und schwimmen eine Zeitlang herum, verfallen dann aber einer allmählichen Degeneration und gehen schließlich zugrunde. Das gleiche gilt für kernlose Teilstücke von anderen Infusorien und Wurzelfüßern. So zeigt Figur 16 einige Zeit nach dem Durchschneiden das kernhaltige Stück (a) einer Amöbe zu einem vollständigen, mit Pseudopodien reichlich versehenen Tier ergänzt, während das kernlose Stück (b) nach einiger Zeit die Bewegungsfähigkeit wie diejenige der Nahrungsaufnahme und anderer Lebensverrichtungen verliert, um bald der Auflösung zu verfallen.

Eine zum Ziel führende Regeneration kann also an Zellen ohne Beteiligung des Kernes nicht stattfinden und wie dieser für die Lebensvorgänge der Zellen im allgemeinen von größter Bedeutung ist, so ist er es für die Regenerationsvorgänge im besonderen, die ohne ihn an der Zelle nicht vor sich gehen können.

Daß Gleiches auch für die Zellen des Metazoenkörpers gilt, braucht kaum besonders bemerkt zu werden, nur wird es sich im einzelnen schwer nachweisen lassen. Am leichtesten sind noch die Eizellen solchen Experimenten zugänglich. Durch Zerschneiden oder Schütteln hat man kernhaltige und kernlose Stücke von Seeigeleiern erhalten, letztere aber, die sonst nicht entwickelungsfähig wären, durch Zuführen eines Spermatozoons und dadurch erzielte Ausbildung eines Spermakerns, wieder kernhaltig gemacht (Boveri). Es ist bekannt, daß befruchtete vorher kernhaltige oder kernlose Eistücke zur Entwicklung gebracht werden können (Boveri) und unter Umständen ganz voll-

ständige Organismen liefern. Daraus ist zu entnehmen, daß auch die als Ausgangspunkt für die Entwickelung der betreffenden Organismen dienenden Eibruchstücke, um diese aus sich hervorgehen lassen zu können, eine gewisse Umgestaltung und Ergänzung ihrer Form und Struktur erfahren mußten, welche man mit gewissen Vorgängen bei der Regeneration immerhin in Vergleich bringen kann. In dieser Beziehung muß jedoch auf die Artikel „Befruchtung", „Ei und Eibildung", „Entwickelungsmechanik" und „Fortpflanzung" verwiesen werden.

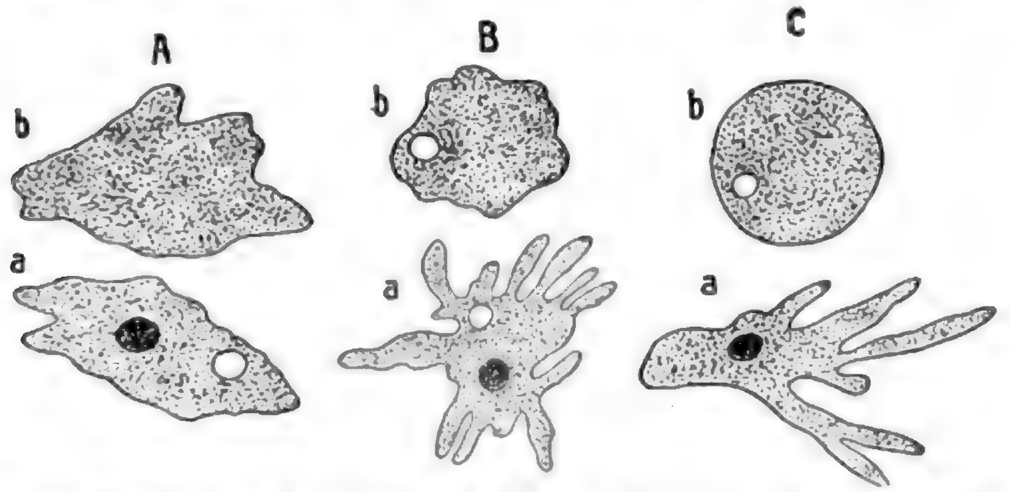


Fig. 16. Kernhaltiges (a) und kernloses Stück (b) einer Amoeba proteus, A unmittelbar nach der Zerteilung der Amöbe, B am 2., C am 3. Tag. Nach Hofer.

4. Verbreitung der Regeneration, Geschichtliches. Daß die Regeneration den Pflanzen zukommt und schon bei den einzelligen Tieren eine wichtige Rolle spielt, ergab sich aus den vorhergehenden Abschnitten. Das gleiche gilt für die mehrzelligen Tiere. Bei ihnen findet man die Fähigkeit, verloren gegangene Teile des Körpers in mehr oder weniger weitgehendem Umfange zu ersetzen, von den niedersten Metazoen, den Schwämmen, bis hinauf zu den Säugetieren und dem Menschen. Im allgemeinen ist dabei zu bemerken, daß die Regenerationsfähigkeit mit der Höhe der Organisation zurücktritt. Nehmen wir unseren eigenen Körper an, so ist er zwar noch befähigt, Wunden auszuheilen und verlorengegangene Teile der Haut, sowie die darunterliegenden Partien (Bindegewebe, Gefäße, Muskeln, Nerven usw.) bis zu einem gewissen, übrigens nicht sehr weitgehendem Umfang neu zu bilden, aber größere Partien, wie etwa Fingerglieder, Teile des Schädels oder sonstigen Knochengerüstes mit den sie umgebenden Teilen der Muskulatur, Gefäßen, Nerven usf. zu ersetzen, ist er nicht in der Lage. Zwar findet beim Menschen wie bei den Säugetieren regelmäßig jene Form des Ersatzes statt, welche man als physiologische Regeneration bezeichnet hat und die in das normale Geschehen am Organismus gehört, wie die Abschuppung der Haut, das Ausfallen der Haare (und Federn der Vögel), das Abwerfen des Geweihes und der kontinuierlich erfolgende Wiederersatz dieser Teile, aber an solche Vorgänge denkt man im ganzen weniger, wenn von Regeneration die Rede ist, sondern diese erscheint uns mehr als Folge von Verletzungen, als das Reparieren eines Defektes, weshalb man sie auch reparative Regeneration nennt.

Die letztere Form der Regeneration ist, wie gesagt, bei höheren Wirbeltieren nur noch im geringen Umfang anzutreffen, denn auch die Vögel zeigen außer der Ersatzmöglichkeit peripherer Teile des Schnabels nach dieser Richtung nur ein geringes Regenerationsvermögen. Im ganzen gilt dies ebenfalls für die Reptilien, wenn nicht bei ihnen die Regeneration des Schwanzes so gut entwickelt wäre, daß der abbrechende und neugebildete Eidechsenschwanz eines der bekanntesten und instruktivsten Demonstrationsbeispiele für diese Erscheinung ist. Durch sogenannte Bruchgelenke und besondere Anordnung der Muskulatur wird die Ablösung des Schwanzes noch unterstützt, auf welche Erscheinung in anderem Zusammenhang zurückzukommen sein wird.

Bei den Amphibien ist das Regenerationsvermögen insofern ein noch weitergehendes, als bei ihnen außer dem Schwanz auch Gliedmaßen ersetzt werden können; sie liefern daher ebenfalls ein instruktives und seit Spallanzanis berühmten Versuchen (1768) allbekanntes Beispiel in der Regeneration der Salamanderextremität, welche vollständig, sogar mit dem Schulterblatt entfernt, wieder von neuem gebildet wird. Auch bei den Fischen sind es die Extremitäten, welche ebenso wie die Schwanzflosse, letztere sogar mit einem Teil des Körpers, neu gebildet werden können.

Den Wirbeltieren wurde als besonders hoch organisierten Tieren und wegen des Vergleichs mit unserem eigenen Körper eine etwas eingehendere Betrachtung gewidmet. Kaum mehr als bei ihnen ist die Regeneration bei den Weichtieren ausgebildet und beschränkt sich im ganzen auf den Ersatz einzelner, nicht besonders umfangreicher Körperteile, wie des Fußes und Mantels, auch Teile des Kopfes und seiner Anhänge (Fühler der Schnecken, Arme der Tintenfische) können ersetzt werden; desgleichen ist die Schale recht regenerationsfähig. Mehr als bei den Mollusken ist das Regenerationsvermögen bei den Gliedertieren entwickelt, indem bei ihnen außer Teilen des Rumpfes die Körperanhänge sehr regenerationsfähig sind. Unterstützt und erleichtert wird dies offenbar durch die periodische Erneuerung der Hautdecke bei der Häutung. Auch bei den Arthropoden können die Körperanhänge durch vorgebildete Stellen (sogenannte Bruchgelenke) für die Ablösung vorbereitet sein.

Sehr regenerationsfähig können auch die Echinodermen (Stachelhäuter) sein, indem bei den Haar-, Schlangen- und Seesternen (Crinoiden, Ophiuriden und Asteriden) nicht nur einzelne Arme, sondern ein beträchtlicher Teil der Scheibe, von welcher die Arme ausgehen, regeneriert werden können. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Linckia, ein in den Meeren der wärmeren Zone lebender Seestern, dessen einzelne abgelöste Arme die verloren gegangenen Arme und die ganze Scheibe neu zu bilden vermögen, wodurch, wenn die vier neuen Arme noch klein sind, die sogenannte Kometenform zustande kommt.

Unter den Würmern finden sich viele mit einem sehr weitgehenden Regenerationsvermögen und die Ringelwürmer (Anneliden) gehören seit den schönen Versuchen von Lyonet (1739), Bonnet (1741), Réaumur (1742), O. F. Müller (1771) zu den beliebtesten Objekten zur Ausführung derartiger Experimente. Es hat sich gezeigt, daß bei ihnen im weitesten Umfang ein Ersatz verloren gegangener Körperteile stattfindet und wenige Körperringe imstande sind, das Vorder- und Hinterende neu zu bilden. In noch weitergehendem Maße ist dieses Vermögen bei gewissen Plattwürmern, nämlich bei den Planarien (einer besonders im süßen Wasser lebenden Gruppe der Strudelwürmer) entwickelt und diese Tiere spielen daher neben den Anneliden in den neueren Untersuchungen über Regenerationsvorgänge eine wichtige Rolle. Kleine Teile aus der Mitte des Körpers, vom vorderen oder hinteren Körperabschnitt genommen, vermögen das Fehlende zu ergänzen und dies ist noch mit Stückchen der Fall, die weniger als $^1/_{100}$ des Körpervolumens betragen.

Aus den mitgeteilten wenigen Angaben ist schon zu ersehen, daß die Regenerationsfähigkeit mit dem Herabsteigen in der Tierreihe und der Vereinfachung der Organisation zunimmt. In fast noch höherem Grade ist dies der Fall bei den in der Tat sehr einfach organisierten Coelenteraten und speziell bei den besonders einfach gebauten Hydroidpolypen. Der zu ihnen gehörende Süßwasserpolyp (Hydra) diente Trembley (1740) zu seinen geradezu glänzenden Regenerationsversuchen, durch welche gezeigt wurde, wie sich ein Tier in eine Anzahl von Stücken zerlegen ließ und jedes von diesen sich zu einem neuen Individuum zu ergänzen vermochte, ähnlich wie man es schon bei Pflanzen kannte und durch Entnahme von Stecklingen praktisch verwertete. Trembleys Aufsehen erregende Versuche forderten zur Wiederholung heraus und wurden an den gleichen oder verwandten, aber auch an anderen Objekten, von denen einige schon vorher erwähnt wurden, von Guettard, Jussieu, Réaumur, Villars, Rösel von Rosenhof, Lyonet, Spallanzani u. a. aufgenommen und weiter geführt. Ueberraschende Resultate haben sich am gleichen Objekt durch Regenerations-, Umkehr- und Pfropfungsversuche auch weiterhin noch ergeben, sodaß die Hydra wie andere Hydroidpolypen und die Anthozoen, besonders Actinien, auch für die moderne Regenerationsforschung höchst beliebte und erfolgreiche Objekte abgaben.

5. Verschiedene Formen und Vollzug der Regeneration. Bei den ungemein verschiedenartigen Organisationsverhältnissen der regenerationsfähigen Tiere, als welche wir bereits alle von den Protozoen bis hinauf zu den Säugetieren kennen lernten, liegt es in der Natur der Sache, daß der Verlauf des Vorgangs ein recht verschiedener sein muß. Bei den Protozoen handelt es sich dabei nur um Verlagerungen, Umformungen und Neubildungen an der Zelle, während bei den Metazoen außer Umgestaltung und Verlagerung von Teilen des Körpers Neubildungen von Zellen und Geweben, also Zellteilungen, eine wichtige Rolle spielen. Vergleicht man die Organisation einer Hydra mit derjenigen eines Platt- oder Ringelwurms und diese wieder mit einem Arthropoden oder Wirbeltier, so braucht auf die große Differenz der in Frage kommenden Körperschichten und somit des Verlaufs der Vorgänge kaum besonders hingewiesen zu werden und dennoch läßt sich in mancher Hinsicht immerhin eine gewisse Uebereinstimmung nachweisen. Ehe darauf eingegangen wird, ist festzustellen, welche verschiedene Arten der Regeneration zu unterscheiden sind; zum Teil mußten sie übrigens schon erwähnt werden. So wurde bereits vorher darauf hingewiesen,

daß eine Art des Ersatzes von Bestandteilen des Körpers ganz normalerweise regelmäßig und kontinuierlich oder auch periodisch, in gewissen Zwischenräumen, während des gewöhnlichen Lebens vor sich geht. Hierher gehört z. B. das Abstoßen der äußeren Oberhautschichten und ihr Ersatz durch die darunterliegenden, allmählich verhornenden Zellen bei den Wirbeltieren, das Häuten der Reptilien und Amphibien, der Haarwechsel der Säugetiere und der Wechsel des Federkleids beim Mausern der Vögel, das Abwerfen und die Neubildung des Geweihes der Hirsche, die Erneuerung der Chitindecke (Häutung) bei den Arthropoden usw. Diese ganz normalerweise eintretende, repetierende Regeneration bestimmter Körperpartien pflegt man: physiologische Regeneration zu nennen und stellt sie der nach Verletzungen, also bei mehr gelegentlichen Substanzverlusten eintretenden okkasionellen, refektiven oder reparativen Regeneration gegenüber, bezeichnet sie wohl auch schlechtweg als „Reparation", d. h. Reparieren eines Defekts; auch hat man sie mit den Namen akzidentelle, restaurative, traumatische oder pathologische Regeneration belegt.

Unter Umständen kommt es zunächst nur zur Bildung einer Schutzvorrichtung über der Wundstelle (Hülle, Zellenkappe und dergleichen) oder zu einem zeitweiligen Ersatz für die erst später auszubildenden neuen Teile, in welchem Fall man von einer „provisorischen Regeneration" spricht.

Daß beim Ersatz verloren gegangener Teile nicht nur Neubildungen, sondern auch Verlagerung, Umordnung, Umgestaltung, Umdifferenzierung der alten Partien und ihres Zellenmaterials eine Rolle spielt, mußte bereits verschiedentlich angedeutet werden. Derartige Vorgänge sind zumal zur Wiederherstellung der richtigen Form nicht zu entbehren. Man bezeichnet sie neuerdings als „Morphallaxis" (Morgan) und stellt sie der echten Regeneration (Driesch), d. h. der Neubildung von Material entgegen, die auch den Namen „Epimorphose" (Morgan) oder „Neomorphose" führt. Wenn die neugebildeten den verloren gegangenen Teilen entsprechen, nennt man dies „Homomorphosis" und spricht von „Heteromorphosen", wenn andersartige Teile gebildet werden. In der Praxis lassen sich diese Unterscheidungen übrigens nicht streng auseinanderhalten; vielmehr gehen die genannten Arten der Regeneration ineinander über, wie sich schon aus dem Vorherigen ergeben dürfte und durch die nachfolgende Darstellung noch weiter bestätigt werden wird.

Um den Verlauf der Regeneration zu schildern, wenn es sich um den Ersatz eines am Körper verloren gegangenen, verhältnismäßig wenig umfangreichen Teiles handelt, sei das schon oben erwähnte, altbekannte Beispiel der Salamanderextremität gewählt. Am Körper abgeschnitten, werden sowohl die vorderen wie hinteren Gliedmaßen neu gebildet und schon Spallanzani konnte feststellen, daß sich dieser Versuch nicht weniger als sechsmal hintereinander erfolgreich wiederholen läßt. Den älteren Forschern wie Bonnet (1777) war auch schon bekannt, daß jüngeren Tieren eine weitergehende Regenerationskraft als älteren eigen ist, welche Erfahrungen von den neueren Autoren bestätigt worden und für den günstigen Erfolg solcher Versuche zu beachten sind.

Ist die Extremität entfernt, so kommt es zunächst darauf an, ferneren Blut- und Säfteverlust, sowie überhaupt weiteren Verlust an Substanz zu vermeiden, die schädigende Wirkung äußerer Einflüsse und die Infektionsgefahr zu verhüten. Die Wunde muß also möglichst bald nach außen geschlossen werden. Dies geschieht im allgemeinen durch Annäherung der Wundränder, sowie dadurch, daß sich gerinnende Blutmassen und erhärtende Gewebereste über die Wunde lagern, durch welche eine Art von Wundschorf gebildet wird, Vorgänge, die sich in ähnlicher Weise bei der Wundheilung anderer Tiere wiederholen. Unter dem provisorischen Wundverschluß beginnen dann sehr bald die eigentlichen Wundheilungsprozesse. Durch das Verdrängen der Wundränder begünstigt, schiebt sich die Epidermis nach Möglichkeit über die Wunde vor. Dies wird gewiß durch Streckung der noch bildungsfähigen Epithelzellen der unteren Epidermisschicht, später aber auch durch die hier eintretende Zellvermehrung ermöglicht. So kommt es je nach dem Umfang der Wunde früher oder später zur Bildung einer Epitheldecke über der Wunde und somit zu einem endgültigen Wundverschluß. Die darüber liegenden, nicht weiter verwendbaren Massen des ersten Wundverschlusses werden später abgestoßen.

Die hier nicht ganz zu entbehrende Darstellung der Wundheilung wurde etwas allgemeiner gehalten, als sie gerade für die Amphibien gilt, bei denen sich die Heilung der Wunde recht glatt und ohne erhebliche Komplikationen zu vollziehen pflegt. So ist der provisorische Wundverschluß wie bei vielen wirbellosen Tieren ein verhältnismäßig geringer. Figur 17 zeigt die Epithelverschiebung an der Wunde bereits 15 Minuten nach Entfernung des Oberarms beim Salamander, das 12 Stunden alte Stadium (Fig. 17 B) läßt den schon recht weit fortgeschrittenen Epithelverschluß erkennen und dieser zeigt an dem weit älteren Stadium der Figur 17 C schon eine ziemlich regelmäßige Beschaffen-

heit, wenn auch die darunter gelegenen Partien noch keine sehr beträchtlichen Veränderungen erfuhren.

Um zunächst bei dem gewählten Objekt, der Regeneration der Salamanderextremität zu bleiben, so vollziehen sich unter dem neugebildeten Epithelverschluß weitere Umbildungs- und Neubildungsvorgänge, welche allmählich zum Ersatz der übrigen verloren gegangenen Gewebe und Organe führen. Leukocyten (weiße Blutkörperchen) treten in Menge auf, um in den Humerusstumpf einzudringen und die für die Neubildung nicht verwertbaren Teile einzuschmelzen. Dabei erfolgt zum Teil eine Vereinigung der Leukocyten zur Bildung von Riesenzellen (Fig. 18 und 19). Ein neues zellenreiches, sich immer weiter vermehrendes Bildungsgewebe tritt unter dem Epithel und in der Verlängerung des Humerusstumpfes hervor (Fig. 17 bis 19, Blz) und infolge der fortschreitenden reichen Zellenvermehrung entsteht über dem Bereich der früheren Wunde am Extremitätenstumpf allmählich eine Erhöhung von zumeist konischer Form, wie sie in ganz ähnlicher Weise bei regenerativen Vorgängen anderer Körperteile bei den verschiedensten Tierformen gefunden und als Regenerationsknospe bezeichnet wird (Fig. 19). Diese Erhebung wird nach und nach immer höher und kann zunächst von einer ziemlich gleichartigen Zellenmasse erfüllt sein. An ihr vollziehen sich dann die Differenzierungsvorgänge, welche zur Ausbildung der die neue Extremität zusammensetzenden Organe und Gewebe (Skelett, Muskulatur, Gefäße, Nerven, Bindegewebe usw.) führen. Figur 20 läßt bereits erkennen, wie in dem die Anlage der neuen Gliedmaßenteile repräsentierenden, jetzt schon ziemlich hoch gewordenen Regenerationskegel aus der Zellenmasse der neue Knorpel in der Fortsetzung des alten Humerusstumpfes hervortritt, während in diesem letzteren noch immer Einschmelzungsprozesse stattfinden. Darauf, wie nun die Verbindung der neuen mit den alten Teilen erfolgt und ein gemeinsames Ganze hergestellt wird, kann hier nicht eingegangen werden. Aus der gemeinsamen Anlage differenzieren sich die axial gelegenen Skeletteile heraus (Fig. 20), die sich dann in die noch fehlenden Teile des Oberarmknochens, Unterarms, der Handwurzel- und Fingerknochen gliedern (Fig. 20). Letztere treten ganz allmählich und nacheinander hervor, wodurch die Anlage der Extremität in den verschiedenen Stadien ihrer Ausbildung ein recht eigenartiges Gepräge erhält (Fig. 20). Die Einzelheiten können hier ebensowenig wie die Entwickelung der inneren Organe verfolgt werden, nur sei noch bemerkt, daß auf diesem Wege eine völlig normale Extremität zustande kommt und daß dies im Verlauf von etwa zwei Monaten geschehen kann.

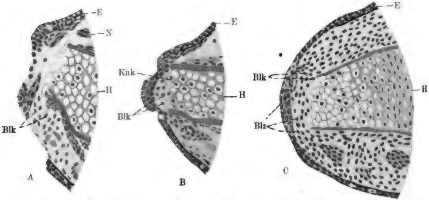


Fig. 17. A bis C. Wundheilung nach Amputation der vorderen Extremität im Bereich des Oberarms der Larve des Feuersalamanders. A 1/4 Stunde, B 12 Stunden, C 8 Tage nach der Operation. Längsschnitte durch den Gliedmaßenstumpf. Blk Blutkörperchen, Blz Blastemzellen (indifferentes Bildungsgewebe), E Epidermis, H Humerus, Knk Knorpelkapsel, N Nerv. Nach C. Fritsch.

Dem Verlauf der Regeneration einer wenig umfangreichen Körperpartie bei einem Wirbeltier seien einige Beispiele von Regeneration niederer und ungleich einfacher organisierter Tiere entgegen gestellt, bei denen es sich um den Ersatz sehr beträchtlicher Teile des Körpers handelt und dementspre-

ehend das Bild der Regeneration ein sehr viel anderes wird. Als sehr geeignete Objekte für Regenerationsversuche wurden schon vorher die Planarien, eine Gruppe der Strudelwürmer (Turbellarien) bezeichnet.

Die Planarien sind ungemein regenerationsfähig; in der Mitte des Körpers quer durchschnitten, bilden sie nach geschehener Wundheilung, Auftreten eines massigen Regenerationsgewebes und eines Regenerationskegels, sowie allmählicher Differenzierung des Außenepithels und der inneren Gewebeschichten an den beiden Teilstücken ein neues Hinter- und Vorderende (Fig. 21 A), auch kann der Wurm in der Längsrichtung durchschnitten die verlorenen Teile ersetzen (Fig. 21 B). Stücke aus der Mitte oder

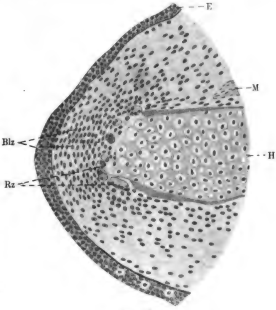


Fig. 18.

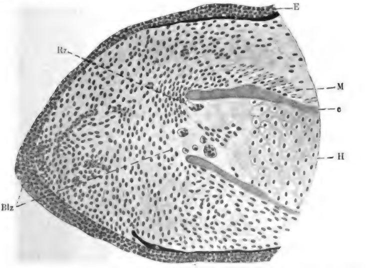


Fig. 19.

Fig. 18 und Fig. 19. Ein 9 und ein 14 Tage altes Regenerationsstadium der Larve des Feuersalamanders nach Amputation der vorderen Extremität im Humerus. Blz Blastemzellen, c Corticalis (verknöcherte Rinde des Humerus), E Epidermis, H Humerus, M Muskulatur, Rz Riesenzellen. Nach C. Fritsch.

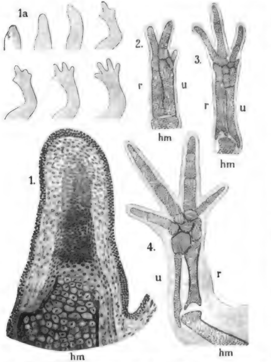


Fig. 20. Gliedmaßenregeneration bei Triton. Regeneration des Salamanderarmes 1a äußere Ausbildung der Regenerationsknopse, 1 ältere Knospe, 2 und 3 Differenzierung des Skeletts, 4 fertige Extremität. hm Humerus, r Radius, u Ulna.

irgendwo aus dem Körper herausgeschnitten vermögen sich zu einem vollständigen Tier zu ergänzen und es gibt ein eigentümliches Bild, wenn bloße Kopfstücke wieder zu einem Wurm auswachsen (Fig. 22). Auf diese Weise ließen sich kleine Planarien von weniger als $^1/_{100}$ des ursprünglichen Körpervolumens erzielen.

Ebenso wie von diesem Objekt wurde ungemein große und weitgehende Regenerationsfähigkeit von dem Süßwasserpolypen (Hydra) erwähnt, welcher, in der verschiedensten Weise zerschnitten, nach erfolgtem Wundverschluß durch Umformung der betreffenden kleinen Stücke und Neubildung von Gewebe in entsprechender Anzahl neue, vollständige Individuen liefert. An diesen entsteht nach Strecken und Auswachsen der Teilstücke das Mundfeld mit Mundöffnung und Tentakelkranz, sowie am entgegengesetzten Ende die Fußscheibe (Fig. 23). Bei Hydra sind kleinste Stückchen von etwa $^1/_{200}$ des Körpervolumens noch regenerationsfähig.

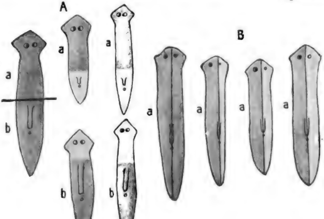


Fig. 21. A Quer durchschnittene, nach hinten (a) und vorn (b) regenerierende Planarie, B längs durchschnitten und die rechte Körperseite neu bildend. Nach Morgan.

6. Herkunft des Regenerationsmaterials. Regeneration und Entwickelung. Bei der Darstellung der Regeneration einiger verschiedener Tierformen mußte die Herkunft des für die Neubildung der regenerierten Partien dienenden Materials zum Teil schon mit berührt werden. Es liegt in der Natur der Sache, daß die Bildung der neuen Teile nach Möglichkeit von den gleichartigen alten aus bewirkt wird, daß diese etwa auswachsen, durch Teilung der Zellen ihrer Gewebe das neue Material liefern und daß auf diese Weise von vornherein eine Kontinuität zwischen den alten und neuen Teilen vorhanden ist. Derartig sahen wir schon vorher (S. 169) das Körperepithel bei der Ueberhäutung der Wunde sich

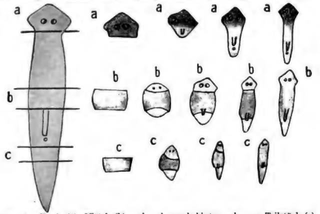


Fig. 22. Kopf- (a), Mittel- (b) und mehr nach hinten gelegenes Teilstück (c) in Regeneration. Nach Morgan.

verhalten; ebenso wird, wenn der Körper eines entsprechend regenerationsfähigen niederen Tiers quer durchgeschnitten wird, sodaß bei der Regeneration fast alle Organe ergänzt werden müssen, im allgemeinen Körperepithel von Körperepithel, Muskeln von Muskeln, Bindegewebe von Bindegewebe, Ganglien von Ganglien, Darmepithel von Darmepithel neu gebildet. Dementsprechend verhalten sich die Gewebe und Organe des Körpers gewiß vielfach bei der Regeneration, aber nicht immer sind die alten Organe in der Lage, die verlorengegangenen Teile von sich aus neu zu bilden. Der Satz „Gleiches von Gleichem", den man zuerst für die Regenerationsvorgänge anzunehmen geneigt war, dürfte zwar für viele, vielleicht sogar für die bei weitem größere Mehrzahl der Fälle gelten, aber allgemeine Gültigkeit besitzt er nicht und zwar auch dann nicht, wenn man ihn etwas weiter, nämlich so faßt, daß die gleichartigen Bildungen als mit der Embryonalentwickelung übereinstimmende, d. h. von dem entsprechenden Keimblatt herrührende angesehen werden.

Wenn wir zunächst bei dem vorher gewählten Beispiel des Ringelwurms (Anneliden) bleiben, so braucht schon die Bildung seines Körperepithels bei der Regeneration nicht unbedingt so zu verlaufen, daß sie durch Vorschieben von den Wundrändern unter hier stattfindender Zellvermehrung erfolgt, sondern die Wundstelle kann zunächst von einer umfangreichen mehrschichtigen Zellenmasse überdeckt werden, von welcher sich

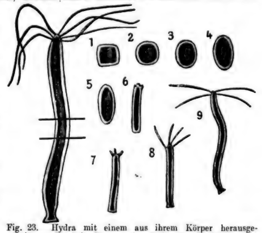


Fig. 23. Hydra mit einem aus ihrem Körper herausgeschnittenen Stück in Regeneration (1 bis 9). Nach Morgan.

dann erst mit der fortschreitenden Differenzierung der neu zu bildenden Teile auch das Körperepithel als oberflächliche Zellenlage abhebt. Auch der darunterliegende Hautmuskelschlauch entsteht (wenigstens zum Teil) aus jener Zellenanhäufung und nicht aus der alten Hautmuskulatur; erstere ist aber ziemlich sicher anderen Ursprungs als bei der Embryonalentwickelung. Ebenso braucht das Nervensystem nicht unbedingt von den alten Teilen geliefert zu werden, sondern kann ebenfalls aus der Wucherung indifferenter Zellen hervorgehen und ähnlich verhalten sich andere Organe wie Peritonealepithel, Blutgefäße und Nierenkanäle. Von besonderem Interesse aber ist das Verhalten des Darmkanals.

Vorder- und Enddarm entstehen in der Embryonalentwickelung gewisser Anneliden als (Stomodaeum und Proctodaeum) in Form grubenförmiger Einsenkungen des äußeren Keimblatts (Ektoderm). Werden Kopf und Schwanz des Tieres abgeschnitten und muß daher der Vorder- wie Enddarm neu gebildet werden, so kann dies einfach durch Auswachsen des entodermalen Mitteldarms bis an das Körperepithel (Ektoderm) des neugebildeten Vorder- und Hinterendes, Verschmelzen mit diesem und Durchbrechen der Mund- oder Afteröffnung geschehen. Vorder- und Enddarm entstammen dann im Gegensatz zur Ontogenie dem inneren Keimblatt (Entoderm) und das Ektoderm ist an ihrer Bildung überhaupt nicht oder in nur ganz geringem Umfang insofern beteiligt, als unter Umständen eine leichte, aber mit der bei der Embryonalentwickelung nicht zu vergleichende Ektodermeinsenkung auftritt. Es ist also eine auffallende Differenz zwischen diesen Entwickelungsvorgängen bei der Regeneration und in der Ontogenie vorhanden.

Aehnliches gilt für die erst neuerdings genauer bekannt gewordenen Regenerationsvorgänge bei den Nemertinen, welche, wie wir es bereits von Anneliden, Planarien und Polypen kennen lernten, sehr regenerationsfähig sind und bei denen Stückchen von $\frac{1}{2}$ bis 1 mm Länge aus dem Körper eines 25 bis 30 cm messenden Wurmes das ganze Tier neu zu bilden vermögen. Dies gilt sogar für solche Stücke des Vorderendes, welche zwischen Gehirn und Mundöffnung liegen, also nichts von Gehirn und Darmkanal enthalten, diese Organe aber neu zu bilden vermögen und zumal den Darmkanal aus ganz andersartigem Material als bei der Ontogenie herstellen müssen (Dawydoff, Nußbaum, Oxner).

Mit den bei Nemertinen und Anneliden geschilderten Vorgängen ohne weiteres vergleichbar sind die Verhältnisse bei den Planarien, deren Pharynx in der Ontogenie ebenfalls aus dem Ektoderm hervorgeht, bei der Regeneration jedoch aus der Masse der Parenchymzellen gebildet wird, also dann mesodermatischen Ursprungs ist. Obwohl dieses Verhalten den Gesetzen der Keimblätterlehre, d. h. der Zurückführung der Organe auf bestimmte Schichten des Embryonalkörpers sehr entschieden widerspricht, läßt sich nach der Darstellung der betreffenden Autoren an der Richtigkeit ihrer Angaben nicht zweifeln. Auch wird deren Wahrscheinlichkeit dadurch unterstützt, daß sich ähnliche Tatsachen auch bei der Entwickelung der betreffenden Organe während der ungeschlechtlichen Fortpflanzung der genannten Tiere, sowie besonders bei derjenigen der Bryozoen und Tunicaten herausstellten, bei denen zumal Darmkanal und Nervensystem auf eine von der Embryonalentwickelung sehr abweichende Weise entstehen können.

Die Beispiele dafür, daß bei der Regeneration gewisse Teile des Körpers auf anderem Wege als in der Ontogenie entstehen, haben sich allmählich gehäuft und so sah man von dem überhaupt recht bildungsfähigen Körperepithel Teile der Muskulatur, des Nervensystems und anderer Organe geliefert werden. Hier soll nur noch ein Beispiel und zwar ein besonders lehrreiches, nämlich dasjenige der Linsenregeneration vorgeführt werden, wie es von verschiedenen Autoren (Colucci, G. Wolff, E. Müller, Fischel) an Salamandern vorgenommen und eingehend beschrieben wurde.

Zum besseren Verständnis dieser merkwürdigen Versuche sei vorausgeschickt, daß die Linse des Wirbeltierauges in der Ontogenie durch eine gruben- später bläschenförmige Ektodermeinstülpung entsteht, welche sich in die vom Gehirn ausgegangene primäre Augenblase einsenkt, wobei letztere die Form eines Bechers annimmt, dessen Rand späterhin die Linse umfaßt (Fig. 24, A—C).

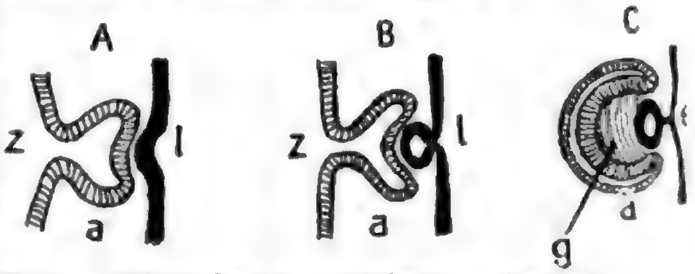


Fig. 24. Bildung der Linse und des Augenbechers der Wirbeltiere. In schematischer Darstellung. a primäre Augenblase, e Einstülpungsstelle der Linse (l), g Glaskörper, z Zwischenhirn.

Wird die Linse wie bei einer Staroperation durch einen Schnitt von vornher vollständig entfernt, so entsteht sie nicht, wie vielleicht erwartet werden könnte, vom Hornhautepithel her, sondern vielmehr vom Rande des Augenbechers durch eine Zell-

wucherung und Verdickung des Epithels der Iris. Die Figur 25 stellt dies in anschaulicher Weise durch einige Stadien bis zur Erlangung der fertigen Gestalt und nicht durchführbar ist, die alten Teile nicht mehr bildungsfähig genug sind, um das neue Material liefern zu können oder andere Ursachen vorhanden sind, welche dies nicht

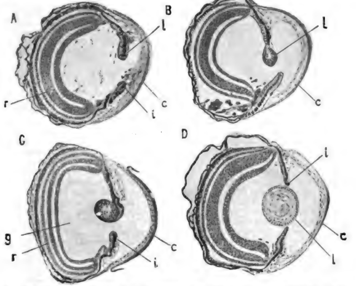


Fig. 25. Neubildung der Linse im Tritonauge nach Entfernung der normalen Linse vom 10. Tage (A) bis zum 21. Tage (D) nach der Operation. c Cornea, g Glaskörper, i Irisrand, l Linse, r Retina. Nach Fischel und E. Müller.

Struktur dar. Die Differenz der embryonalen und regenerativen Linsenentwicklung liegt ohne weiteres auf der Hand.

Die Entstehung der Augenlinse aus anderem als dem dafür bestimmten Material konnte in äußerst sinnreicher Weise dadurch erwiesen werden, daß die über der embryonalen Augenblase gelegene Kopfhaut bei Froschembryonen entfernt und durch ein Stück Haut des Hinterleibes (sogar von einer anderen Spezies) ersetzt wurde. Unter dem Einfluß der darunterliegenden Augenblase entstand daraus die Linse, wie sie auch dann sich bildete, wenn die Augenblase vom Gehirn abgetrennt und an eine andere Stelle unter die Haut verlagert wurde (Lewis). Dies sind aber Versuche, die in das Gebiet der Transplantation gehören und hier nicht weiter berücksichtigt werden können (vgl. den Artikel „Transplantation").

Im allgemeinen besteht das Bestreben, die verloren gegangenen Teile von den noch vorhandenen aus neu zu bilden, wobei dann ohne weiteres gleiches von gleichem herkommt. Wenn dies aber aus irgend welchen Gründen gestatten, so wird versucht, das für die Regeneration nötige Material anderswoher zu beschaffen. Daß dies möglich ist und wie es gelingt, zeigen die vorhergehenden Beispiele, die sich noch weiter vermehren ließen.

Zur Demonstration dieser Verhältnisse erweisen sich jugendliche Individuen, Larven und Embryonen besonders geeignet, wie wir schon früher hörten, daß bei älteren Tieren Regenerationsversuche weniger gute Erfolge zeigen als in der Jugend. Die einzelnen Körperpartien sind jedenfalls noch bildungsfähiger und die Differenzierung ist noch weniger weit vorgeschritten. So hat man in weitem Umfang Versuche nach der Richtung ausgeführt, an Embryonen größere oder geringere Substanzverluste hervorzurufen, um die daraufhin eintretenden Entwickelungsvorgänge unter den besonderen, künstlich gesetzten Bedingungen zu verfolgen und im Vergleich mit den normalen Bildungsprozessen zu analysieren. Unter Umständen entstehen an den Stellen bedeutender Substanzverluste diejenigen Teile, welche normalerweise dort zur Entwickelung

kommen sollten, trotz der Entfernung ihres ursprünglichen Bildungsmaterials. Wird z. B. an jungen Froschlarven zur Zeit der Anlage der Gliedmaßen die Region, in welcher sie zur Ausbildung kommen sollen, zerstört, so sind sie bei Ueberstehen der Verwundung dennoch in der Lage, die betreffenden Extremitäten zur Ausbildung zu bringen. Es wird also anderes Material dazu verwendet, welches Faktum wir bei verwandten Tieren (Salamandern) durch das Verhalten der ausgewachsenen Individuen bestätigt sahen.

Ein Ersatz der verloren gegangenen oder besser eine Neubildung von Teilen an Stelle der am Embryonalkörper entfernten Partien kann in sehr weitem Umfang und wenn der Eingriff früh genug vorgenommen wird, auch nach Entfernung der einen Körperhälfte oder eines beträchtlicheren Teils noch erfolgen. In solchen Fällen hat man unter bestimmten Umständen von einer Postgeneration gesprochen (Roux). Die Frage nach der Art der hierbei sich vollziehenden Neubildung und nach der Beschaffung des dafür nötigen Materials gehört in das Gebiet des Determinationsproblems und somit in dasjenige der Entwicklungsmechanik, die in einem besonderen Artikel behandelt wird (s. den Artikel „Entwickelungsmechanik").

Hier sei nur noch die wichtige, aber schwer zu beantwortende Frage gestreift, woher bei der Bildung von besonderem, zunächst indifferentem Regenerationsmaterial (oder bei der Bildung von ungleichartigen Teilen aus) das Zellenmaterial für den Aufbau der neuen Partien stammt. Ob etwa im Körper von der Embryonalentwicklung her unentwickelt gebliebene Zellenkomplexe vorhanden sind oder ob die bereits differenzierten Zellen der Gewebe und Organe befähigt sind, die Rückdifferenzierung in einen indifferenten Zustand durchzumachen und ganz andere Gebilde aus sich hervorgehen zu lassen als diejenigen, für welche sie vorher bestimmt waren. Daß letzteres in der Tat möglich ist und derartige Vorgänge bei der Regeneration sogar eine große Rolle spielen, wird im nächsten Abschnitt noch zu erweisen sein, doch bleibt außerdem die Möglichkeit des ersteren durchaus bestehen.

Bei dem Auftreten indifferenten Zellenmaterials und der allmählichen Herausbildung der einzelnen Organe aus ihm tritt der Charakter der Regeneration als Entwickelungsvorgang oder als einer Folge von solchen, besonders deutlich hervor. Wie bei der Embryonalentwicklung wird der endgültige Zustand durch eine Reihe aufeinander folgender (und wie dort ineinander übergehender) Stadien erreicht. Der Ausgangspunkt ist freilich ein anderer, indem die Ontogenie des Metazoons von nur einer Zelle, der Eizelle, ausgeht. Darin sind beide Vorgänge aber wieder gleich und das ist gerade das Wesen der Entwickelung, daß durch sie ein vom Ausgangspunkt sehr verschiedenartiges Ziel erreicht wird. Bei der Regeneration erscheint es uns besonders auffallend und schwer verständlich, daß von ganz abweichend gestalteten Partien des Körpers neue Teile gebildet werden, welche mit ihnen ein einheitliches Ganze bilden, indem sie den verloren gegangenen Teilen in Form und Struktur völlig gleichen. Zur Ermittelung der Faktoren, welche dies ermöglichen, wurden die vorhergehenden Erörterungen größtenteils angestellt und sollen auch die nachfolgenden dienen.

7. Ausbildung und Wachstum des Regenerats, Restitution und Regulation (Umgestaltungs-, Rück- und Umdifferenzierungsvorgänge usw.). Es wurde bereits gezeigt, daß die Neubildung umfangreicher verloren gegangener Teile häufig unter Vermittlung der als Regenerationsknospe bezeichneten kegelförmigen Erhebung erfolgt. Diese besteht in vielen Fällen aus mehr oder weniger indifferentem Gewebe, dessen Differenzierung dann in verschiedener Weise geschieht. So kann sie von der Spitze beginnend nach der Basis fortschreiten, wie dies für die Extremitätenanlagen bei Arthropoden und Vertebraten festgestellt wurde, aber sie kann auch in umgekehrter Richtung vor sich gehen, wofür ebenfalls aus den genannten Tiergruppen Beispiele zu bringen wären. Zur Demonstration des letzteren Verhaltens sind die in der Jugend ausgesprochen kegelförmigen Regenerate des Annelidenkörpers besonders geeignet, indem ihre ungemein lang werdenden Schwanzregenerate an der Basis eine sehr weit gehende Ausbildung der Organe erkennen lassen, gegen das Ende hin jedoch deren Anlagen eng zusammengedrängt bis zu einer noch indifferenten ganz an der Spitze gelegenen Zellenmasse zeigen (Fig. 26).

Die zuletzt besprochenen Regenerate am Annelidenkörper bilden dessen direkte Fortsetzung (Fig. 26) und entsprechen damit einem Gesetz, welches man als durchgehends richtig erkannt hat, nämlich daß das Regenerat senkrecht zur Schnittfläche orientiert ist. Stellt diese wie im vorliegenden Fall einen Querschnitt durch den Körper dar, so fällt dessen Längsachse mit derjenigen des Regenerats ungefähr zusammen; ist die Wundfläche dagegen schräg gerichtet, so gilt dies auch für das Regenerat. Die Produktion von Regenerationsmaterial erfolgt also über der Wunde immer in derselben Weise und unabhängig davon, wie sich diese zum Körper verhält; sie wird somit von diesem weniger als von der Wunde selbst beeinflußt, wenn man auch freilich derartige Gesetze

nicht als unbedingt für alle Fälle geltend und als ausnahmslos feststehend betrachten darf. Es können an der Wundfläche selbst und in ihrer Beziehung zum Körper besondere Verhältnisse herrschen, welche die Bildung des Regenerationsgewebes und damit die Orientierung des Regenerats am Körper beeinflussen, so daß es eine von jener normalen Stellung abweichende Richtung erkennen läßt. Die normale Orientierung wird außer durch die Schwanzregenerate Fig. 26 durch die in Fig. 27 dargestellten Köpfe erläutert; die von zwei Regenwürmern durch einen queren und durch einen schräg gerichteten Schnitt abgetrennt wurden; im ersteren Fall ist das Regenerat längs, im anderen Fall ausgesprochen schräg orientiert. Solche abnorm gerichtete Regenerate können für das Tier kaum dauernd nützlich sein, sondern wenn sie zur richtigen Verwendung kommen sollen, müssen sie eine nachträgliche Verlagerung und Einstellung möglichst in die richtige Orientierung durchmachen. Dies ist nur durch Wachstums- und Umgestaltungsvorgänge innerhalb der alten und neuen Partien möglich, wie sie bei der Geraderichtung von Schwänzen und Gliedmaßen bei Würmern, Fischen und Froschlarven durch **Barfurth**, **Morgan** u. a. verfolgt wurde („**funktionelle Orthopädie**" von **Barfurth**).

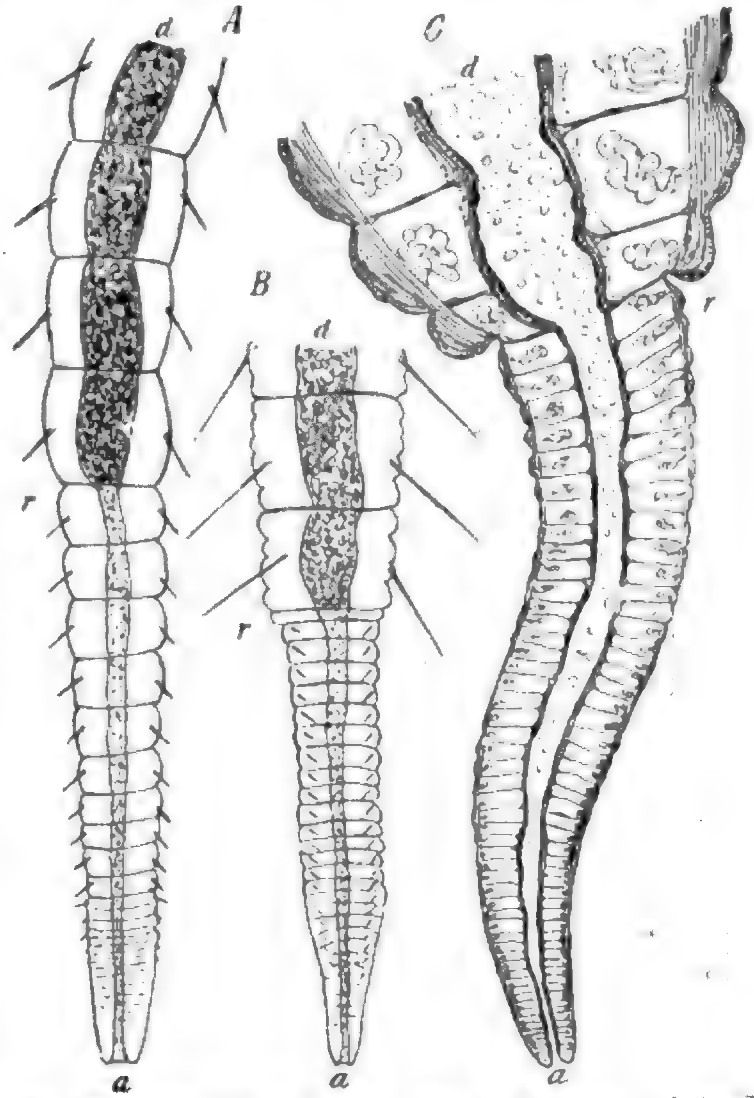


Fig. 26. Schwanzregenerate von Anneliden. A Lumbriculus, B Tubifex, C Lumbricus (Regenwurm). Nach Entfernung beträchtlicher Teile des Hinterendes; oben die alten Teile, bei r beginnt das Regenerat, d Darm, a After.

Daß Umgestaltungen der Teile, verbunden mit Verlagerungen, Wachstumsvorgängen, Rückbildungen und Neubildungen beim Ersatz der verloren gegangenen Teile eine wichtige Rolle spielen, mußte schon wiederholt ausgesprochen werden. Es wurde bereits auf die kleinen Teilstücke aus dem Körper von Planarien und Polypen verwiesen (Fig. 22 und 23), welche derartige Verhältnisse deutlich erkennen lassen. Noch ausgesprochener ist dies bei anderen Versuchen mit wenig umfangreichen Teilstücken verschiedener Planarien der Fall; diese erfahren in dem Bestreben, sich der Form der stark verkleinerten Individuen anzupassen, starke Veränderungen ihrer Gestalt und in ihren Geweben müssen ganz beträchtliche Verlagerungen und sonstige Umänderungen vor sich gehen (Morphallaxis). Die beigegebene Figur 28 erläutert dies in sehr überzeugender Weise für Stücke verschiedener Körperregionen von **Planaria** und besonders für ein der vorderen Körper-

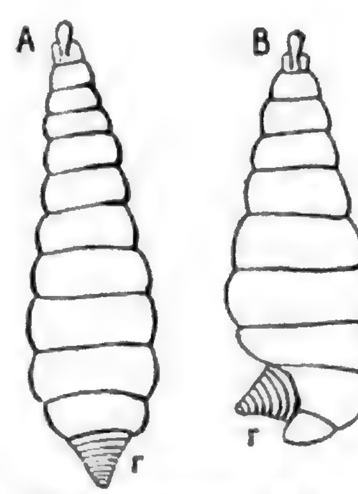


Fig. 27. Zwei Kopfstücke eines Regenwurms (Eisenia foetida) mit Regeneraten (r) auf quer (A) und schräg (B) geführter Schnittfläche.

partie entnommenes breites Teilstück von Bipalium, einer Erdplanarie von ziemlich langgestreckter, schlanker Form. Letztere konnte in diesem Fall nur durch bedeutende Längsstreckung des Stückes, an welchem sich ein neuer Kopf bildet, wieder erlangt werden (Fig. 28D).

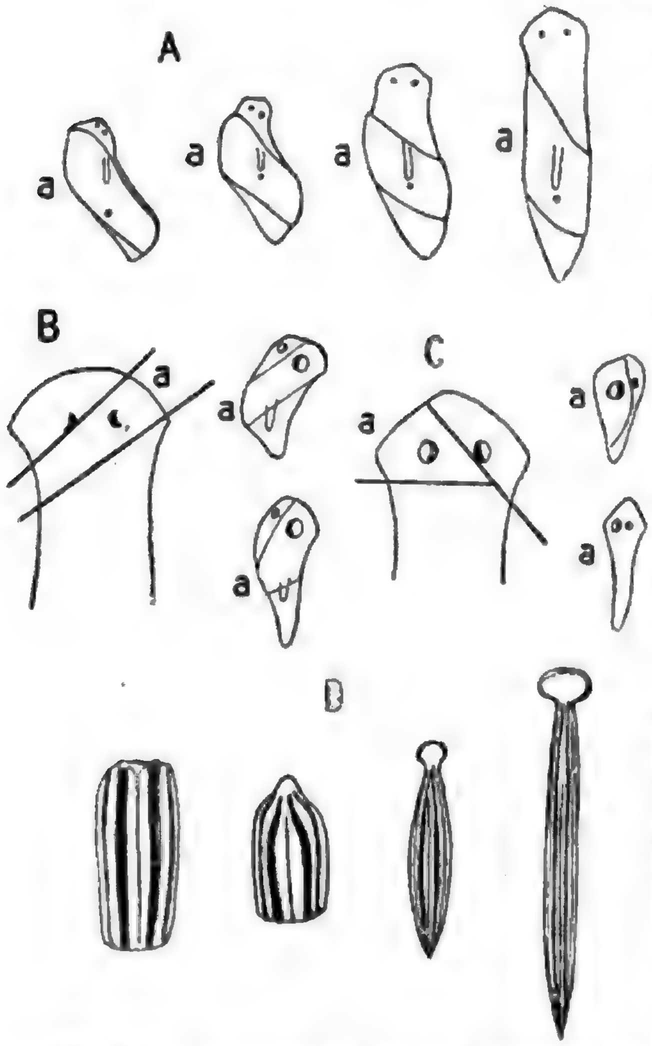


Fig. 28. Regeneration kleiner Teilstücke verschiedener Körperregionen von Planarien. A Pharynxgegend, B und C Kopfregion, D Stück aus der vorderen Körperregion von Bipalium in seiner Ausgestaltung binnen 18 Tagen. Nach Morgan.

Derartige Umbildungen können auch einzelne Körperpartien betreffen, z. B. Arthropodengliedmaßen, die man nach Verlust eines nicht unbeträchtlichen Teiles nicht durch Neubildung des Verlorenen, sondern durch geeignete Zurichtung des Uebriggebliebenen zu einer brauchbaren Extremität umgebildet werden sah. Aehnliches beobachtet man an anderen Stellen des Körpers, um diese Partien nach Verletzung für den weiteren Gebrauch geeignet zu machen, sei es, daß sie in ihrer Form entsprechend verändert, sei es, daß einzelne Organe (wie z. B. das Gehirn oder der Pharynx der Planarien) an andere Stellen verlagert oder von neuem dort angelegt werden, wo sie unter den veränderten Verhältnissen am geeignetsten verwendbar sind. Derartige Wiederherstellungen des Verlorenen durch Wachstums-, Umgestaltungs- und Neubildungsvorgänge pflegt man Regulationen zu nennen. Die Regulation besteht in der Rückkehr zum physiologischen Gleichgewicht, nachdem dieses durch irgendwelche Eingriffe gestört war.

Bei den Wiederherstellungsregulationen oder Restitutionen (Driesch) findet eine mehr oder weniger weitgehende Umwandlung, eine Einschmelzung von Teilen, sowie in Verbindung damit, jene Vorgänge erst ermöglichend, eine Rück- und Umdifferenzierung von Zellen statt. Einige Beispiele dürften dies ohne weiteres erläutern. So vermögen recht kleine, vom oberen Teil des Körpers einer Hydra abgeschnittene Stücke, die nur aus einigen Tentakeln und einer ganz geringen, sie an der Basis verbindenden Partie des Mundfeldes bestehen, den ganzen Körper der Hydra neu zu bilden, was unter Umständen dadurch ermöglicht wird, daß ein Tentakel durch allmähliche Vergrößerung und Erweiterung zur Bildung des Körpers herangezogen, andere Tentakel dabei jedoch zugunsten der Ausbildung des übrigen Körpers zurückgebildet werden (Peebles, Rand, Kölitz). Wenn es möglich ist, das ganz andersartige Zellenmaterial der Tentakel derartig zu verwenden, so müssen nicht nur weitgehende Umänderungen, Umgestaltungen und Verlagerungen, sondern besonders Rück- und Umdifferenzierungen stattgefunden haben. Ebenso oder wohl noch in höherem Maße muß dies bei manchen anderen Objekten geschehen, z. B. bei verhältnismäßig kleinen Teilstücken von Polypen, Planarien oder Anneliden, welche zu neuen Individuen auszuwachsen und alle deren Organe zu liefern vermögen, ohne daß die betreffenden Teile in ihnen vorhanden zu sein brauchen. So können wenige Segmente des Annelidenkörpers unter Umständen ein vorderes Regenerat mit Mund, Vorderdarm, Gehirn usw., sowie ein Schwanzregenerat mit After, Enddarm usw. liefern, welche Organe in ihm natürlich nicht vorhanden sein konnten. Kleine, aus verhältnismäßig wenigen Körperringen bestehende Stücke von Regenwürmern sind befähigt, aus sich heraus ohne jede Nahrungsaufnahme, denn einen Mund besitzen sie nicht, lange und voluminöse Regenerate zu bilden, welche das alte Stück schließlich an Umfang übertreffen (Fig. 29 bis 31). Hier müssen also in dessen Innern weitgehendste Umgestaltungen und Umdifferenzierungen stattgefunden haben, um das Zellenmaterial für den Aufbau der in jenen umfangreichen Regene-

raten vorhandenen Organe zu liefern, da dieses Material einen anderen Ursprung nicht haben kann.

Es dürfte nicht ohne Interesse sein, daß ähnliche Vorgänge sich auch im Pflanzenkörper abspielen und durch gelegentliche Beobachtungen, wie auch durch die besonders darauf gerichteten Versuche von Vöchting, Klebs, Goebel, Winkler u. a. bekannt

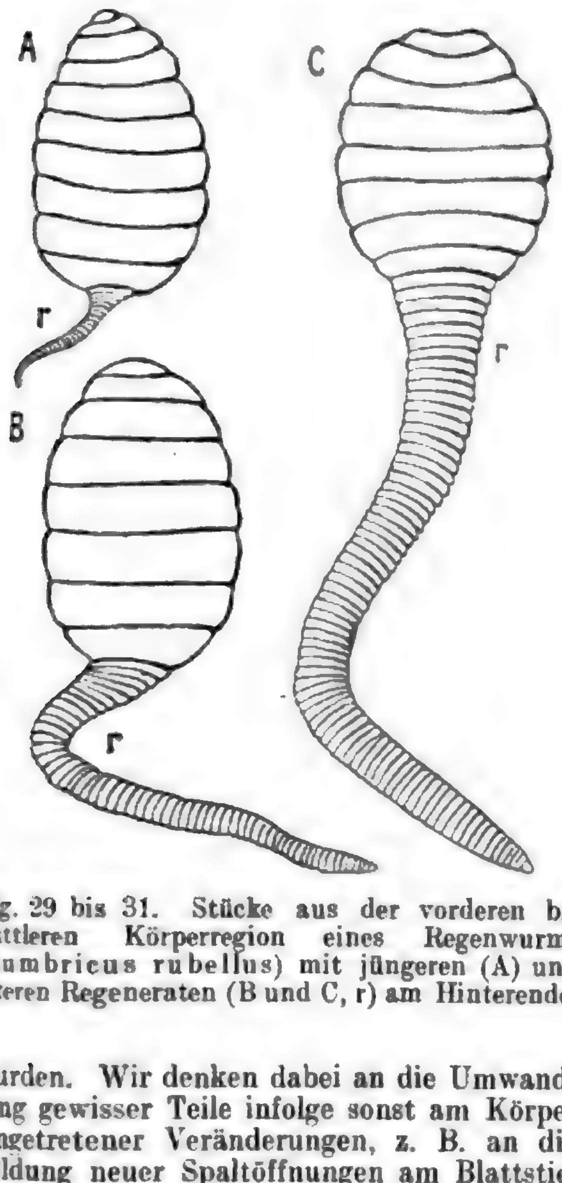


Fig. 29 bis 31. Stücke aus der vorderen bis mittleren Körperregion eines Regenwurms (Lumbricus rubellus) mit jüngeren (A) und älteren Regeneraten (B und C, r) am Hinterende.

wurden. Wir denken dabei an die Umwandlung gewisser Teile infolge sonst am Körper eingetretener Veränderungen, z. B. an die Bildung neuer Spaltöffnungen am Blattstiel nach dem Verlust der Fiederblätter bei Robinia pseudacacia, die Umwandlung von Blütenständen in Laubtriebe bei Chrysanthemum, Veronica und anderen Pflanzen, sowie noch andersartige Uebertragung bestimmter Funktionen auf Pflanzenteile, welche diese Verrichtungen bis dahin nicht besaßen. Bekannte Beispiele hierfür liefert das Hervorrufen von Knollenbildungen an Teilen, an denen sie sonst nicht gebildet werden. So wurden durch Unterdrückung der typischen Stengelknollen bei Helianthus tuberosus atypische Wurzelanschwellungen mit speichernder Funktion hervorgerufen; bei Oxalis crassicaulis konnten nach Entfernen des Scheitels und der Achselsproßanlagen der oberirdischen Ausläufer Knollen in den Internodien und sogar an den Blättern erzielt werden, obwohl diese sonst nur an den unterirdischen Rhizomen vorkommen. Bei der Kartoffel sind durch geeignetes Einpflanzen, Verdunkeln des unteren Stengelteils, aber auch wenn er sich im Licht befindet, an seinen basalen seitlichen Ausläufern Knollen zu erzielen, ja sogar an den Laubsprossen ist dies möglich, wenn die Pflanzen aus solchen Stecklingen gezogen wurden, welche zwar Wurzeln, aber infolge des Mangels von Knospen im Boden normalerweise keine Knollen zu bilden vermögen (Fig. 30). Wenn es sich auch bei diesen Vorgängen am Pflanzenkörper zum Teil um weitere und andersartige Ausbildung schon vorhandener Anlagen handelt, so müssen doch andererseits auch bereits differenzierte Teile in andere Strukturen überführt und umgestaltet werden, was ohne Umdifferenzierung von Zellenmaterial kaum durchführbar ist. Insofern sind diese Erscheinungen also mit den vorher vom Tierkörper besprochenen sicher vergleichbar. Auf die bei diesen regulatorischen und Restitutionsvorgängen am Pflanzenkörper wirksamen Faktoren kann hier nicht eingegangen werden, sondern es sei in dieser Beziehung wie im Hinblick auf ähnliche Vorgänge bei den Pflanzen auf den Artikel: „Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Pflanzen" verwiesen.

Zu den bei der Regeneration am Tierkörper eintretenden regulatorischen Vorgängen ist auch die, freilich ziemlich andersartig erscheinende, kompensatorische Regulation zu rechnen, die im wesentlichen darin besteht, daß der Verlust eines Körperteils die stärkere Ausbildung eines anderen nach sich zieht. Da gerade von gewissen Erscheinungen am Pflanzenkörper die Rede war, so kann gleich hinzugefügt werden, daß auch an ihm hierher zu rechnende Vorgänge bemerkbar sind, z. B. das vorher erwähnte Auftreten von Knollen, aber auch von Sprossen und anderen Organen, wenn diese an den dafür bestimmten Stellen entfernt oder in ihrer Ausbildung verhindert werden. Ein besonders geeignetes Beispiel bietet am Gipfel des Coniferenstammes der abgeschnittene Hauptsproß, welcher durch allmähliches Aufrichten der vorher annähernd horizontal gestellten Seitenzweige und Aenderung ihres dorsoventralen in seinen radiären Bau bewerkstelligt wird. Bei Blättern, welche in symmetrischer Verteilung oder in der Zweizahl vorhanden sind, kann bei Entfernung des einen das dazu symmetrisch gelegene Blatt sich stärker entwickeln, wie es z. B. für die Keimblätter einiger Pflanzen gilt.

Bei bilateral gebauten Tieren ist es vor allen Dingen die stärkere Ausbildung von Organen der einen Seite, welche bei Verletzung derjenigen der anderen Seite in auffallender Weise hervortritt. Das lehrreichste Beispiel dafür ist das Verhalten der mit asymmetrisch entwickelten Scheren ausgestatteten lang- und kurzschwänzigen Krebse, die auf der einen Seite eine größere, sogenannte Schnalzschere, auf der anderen Seite eine kleinere, sogenannte Zwickschere besitzen. Wird die größere entfernt, so wächst an ihrer Stelle nur eine kleine Schere nach, während die kleine Zwickschere der Gegenseite, welche von der Operation gar nicht betroffen war, sich zu der großen Schnalzschere umgestaltet und also diejenige der anderen Seite ersetzt. Die Entfernung der Zwickschere hat nur den Ersatz einer kleinen Schere zur Folge. Aehnliches ist auch von anderen Tierformen bekannt und ferner kann die kompensatorische Regulation dann zu einer kompensatorischen Hypertrophie werden, wenn das Wachstum des sonst ungefähr gleich großen Organs beim Verlust desjenigen der Gegenseite beträchtlich über den gewöhnlichen Umfang hinausgeht. Ein Beispiel dafür bildet die vorher erwähnte Vergrößerung eines Keimblattes gewisser Pflanzen beim Verlust des anderen und in ähnlicher Weise kennt man die Erscheinung von verschiedenen Organen des Wirbeltierkörpers, z. B. von Muskeln, Speicheldrüsen, Leber, Hoden. Werden die Milchdrüsen des erwachsenen Kaninchens auf der einen Seite entfernt, so erfahren diejenigen der anderen Seite eine ungefähr entsprechende Vergrößerung, um nur einen dieser Fälle namhaft zu machen.

8. Reduktionsvorgänge. Bei den im vorigen Abschnitt behandelten, mit der Regeneration in enger Verbindung stehenden Umgestaltungsvorgängen mußte schon verschiedentlich auf die, einzelne Körperpartien und ihre Gewebe betreffende Rückbildung verwiesen werden, ohne welche die Umformung und der Wiederaufbau der betreffenden Teile nicht durchführbar wäre. Diese Reduktionsprozesse spielen nun eine große Rolle und sind zum Teil sehr weitgehender Natur. Daß solche Rückbildungen von Zellenmaterial und dessen Ueberführung in eine andere Form stattfinden müssen, ist z. B. in solchen Fällen, in welchen aus kleinen Teilstücken ohne deren Ernährungsmöglichkeit umfangreiche Regenerate hervorwachsen (Fig. 31), ohne weiteres zu entnehmen, wenn sich auch der wirkliche Nachweis nur schwer führen läßt. In anderen Fällen ist dies noch augenscheinlicher, so in den ebenfalls schon vorher besprochenen, in welchen bei Teilstücken von Polypen einzelne Tentakel rückgebildet wurden, um ihr Zellenmaterial zum Aufbau anderer Körperteile zu verwenden. Ebenso können Teile des Stammes zur Bildung neuer Köpfchen und Tentakel verwendet oder es können ganze Köpfchen zur besseren Ausgestaltung anderer Teile aufgebraucht werden. Solchen destruktiven und regulatorischen Reduktionen (Driesch) fallen auch bei anderen Tieren (Anthozoen, Würmern) einzelne Körperpartien oder Organe zum Opfer, um sie mit dem daraus und durch Neubildungsvorgänge gewonnenen Material an geeigneter Stelle wieder aufzubauen. Die ausgedehnten Versuche von Driesch, Child, Godlewski und einer Reihe anderer Autoren haben über diese und verwandte Vorgänge eine ziemlich weitgehende Kenntnis verbreitet.

Reduktionsvorgänge werden nicht selten infolge von Verletzungen dadurch hervorgerufen, daß Teile des Körpers nicht mehr in genügender Weise ernährt werden oder bei den am Körper vor sich gehenden Neubildungen keine richtige Verwendung finden. Ein gutes Beispiel dafür liefert ein polychaeter Ringelwurm, Ophryotrocha puerilis, welcher nach Wegnahme einiger vorderen Körpersegmente eigentümliche Degenerationserscheinungen zeigt (Czwikilitzer). Diese pflegen am Hinterende mit dem Schwinden der Cirren des Endsegments zu beginnen, um sich auf die vorhergehenden Körperringe zu übertragen und hier zur Rückbildung der Fußstummel und Borsten zu führen (Fig. 32). Dasselbe Bild zeigt, daß auch am Vorderende Degenerationen eintreten, die schließlich zum Schwund aller äußeren und inneren Differenzierungen des Körpers fortschreiten; letzterer wird am Ende zu einem bloßen schlauch- oder sackförmigen Gebilde, als welches er zuletzt abstirbt. Zu diesem ungünstigen Ausgang braucht es jedoch nicht zu kommen, sondern nach Rückbildung der Fußstummel auf der einen und teilweise auch auf der anderen Seite kann der Degenerationsprozeß zum Stillstand kommen, eine „Auffrischung" setzt ein, um zu einer allmählichen Wiederherstellung der Körperorganisation zu führen.

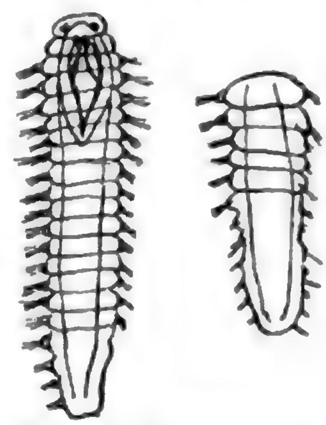


Fig. 32. Ophryotrocha puerilis nach Verletzung in Degeneration. Nach Czwiklitzer.

Noch weiter gehende Reduktionsvorgänge treten nach den Beobachtungen von Driesch bei der Regeneration der Ascidien (Seescheiden) auf. Ihr Körper, an dem man die 4 in Figur 33 bezeichneten Regionen unterscheiden kann, ist sehr regenerationsfähig. Sowohl die untere wie die obere Partie kann nach Abtrennung von den mittleren Partien in verhältnismäßig kurzer Zeit regeneriert werden. Bei älteren Tieren geschieht der Ersatz der abgetrennten Teile am Kiemenkorb durch Neubildung von Zellenmaterial mittels einer Regenerationsknospe am unteren Ende des Kiemenkorbes. Auch bei mittelgroßen Tieren wird die Regenerationsknospe gebildet, aber dieser Ansatz zu einer Restitution der Teile auf echt regenerativem Wege wird nicht fortgeführt. Es scheint, als ob er nicht mehr möglich sei, vielmehr treten Reduktionsvorgänge ein, welche Undeutlichwerden der Organisation und schließlich deren völlige „Einschmelzung" mit sich bringen. Bei kleineren, sehr jungen Ascidien kommt es überhaupt nicht mehr zur Bildung einer Regenerationsknospe, sondern nach der Operation beginnen schon bald jene Rückbildungsvorgänge am Kiemenkorb, welche ihn so weit umgestalten, daß schließlich nur noch ein weißlicher Klumpen vorhanden ist, an dem sich sich keinerlei Organisation mehr erkennen läßt. Aus ihm bilden sich dann ganz allmählich die neuen Organe wieder heraus, bis die ganze Ascidie wieder hergestellt ist. Hier führt also die Restitution durch Destruktion zu einer Art Verjüngung und Umarbeitung des gesamten Materials, sowie zu einer vollständigen Neubildung des ganzen Organismus aus der anscheinend völlig formlosen Masse.

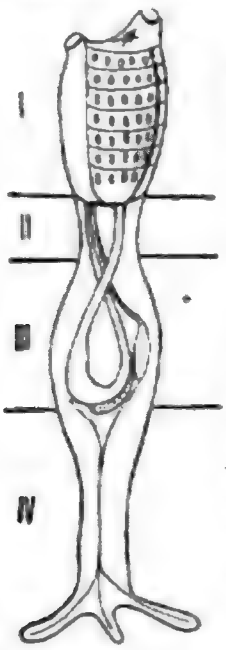


Fig. 33. Clavellina, I Kiemenkorb, II Region des Anfang- und Enddarms, III Eingeweidesack mit Magen, IV Stammstolo. Nach Driesch.

Mit diesen Vorgängen sehr übereinstimmend, wenn auch, weil nicht mit Regeneration verbunden, eigentlich nicht in diesen Kreis der Erscheinungen gehörig, sind andere, bei denen ebenfalls mehr oder weniger weit gehende Reduktionen eines Teiles oder der gesamten Körperorganisation stattfinden und die daher an dieser Stelle nicht übergangen werden dürfen. Einige beruhen ebenfalls auf den von Driesch angestellten Beobachtungen und beziehen sich wie die soeben geschilderten gleichfalls auf Ascidien. Wenn er Clavellinen, die auch zu jenen anderen Versuchen dienten, in Aquarien mit nicht zirkulierendem Wasser hielt, so erfuhren Kiemenkorb und Eingeweidesack ganz ähnliche Rückbildungen, wie diejenigen, welche wir vorher als Folge von Verletzungen kennen lernten. Aus der anscheinend ganz desorganisierten Masse bildet sich beim Eintritt besserer Verhältnisse im Verlauf einiger Wochen wieder eine neue Ascidie heraus, welche dann unter Umständen einen nochmaligen Reduktionsprozeß und eine abermalige Auffrischung durchmachen kann.

Rückbildungserscheinungen ähnlicher Art hat man durch Hungerwirkung erzielt (E. Schultz); als Versuchsobjekte dienten dabei mit Vorliebe Planarien und Hydra. Bei ersteren wird durch wochen- und monatelanges Hungern eine sehr beträchtliche Verringerung des Körperumfangs erzielt, die bis zu $^1/_{12}$ ihrer gewöhnlichen Größe und $^1/_{300}$ ihres Volumens betragen kann. Figur 34 erläutert dies durch Umrißzeichnungen in anschaulicher Weise. Es braucht kaum bemerkt zu werden, daß dabei Veränderungen der inneren Organisation nicht ausbleiben werden, wenn sie auch längst nicht so weit gehend und vor allem nicht so leicht nachweisbar wie bei den Ascidien sind. An einigen Organsystemen allerdings sind sie verhältnismäßig leicht zu erkennen. So geht die Pigmentierung des Körpers zurück (Fig. 35), die Augen erfahren einen allmählichen Zerfall (Fig. 36) und vor allen Dingen werden die Geschlechtsorgane zurückgebildet, was bis zu einem gänzlichen Schwund dieses bei den Planarien außerordentlich umfangreichen Organsystems führen kann, hier aber nur durch das Verhalten des Ovariums erläutert werden soll (Fig. 37). Die (stets im größten Umfang des Eierstocks dargestellten) Schnitte zeigen dessen Zurückgehen im Verlauf von 8 Monaten, doch wird er schließlich ganz zurückgebildet. Trotzdem können die gesamten Geschlechtsorgane, wenn die Tiere unter normalen Bedingungen leben und gut gefüttert werden, nach 3 bis 4 Monaten wieder zur Ausbildung gebracht werden, wie überhaupt die Tiere in dieser Zeit von neuem heranwachsen und ihre ursprüngliche Länge ziemlich wieder erreichen können (E. Schultz, Stoppenbrink, Berninger). Ganz neuerdings haben Nußbaum und Oxner die Hungerwirkung auf Nemertinen eingehend studiert und die in ähnlicher Weise weitgehenden Reduktionen auch in histologischer Beziehung verfolgt. Ganz besonders lehrreich ist das Verhalten von

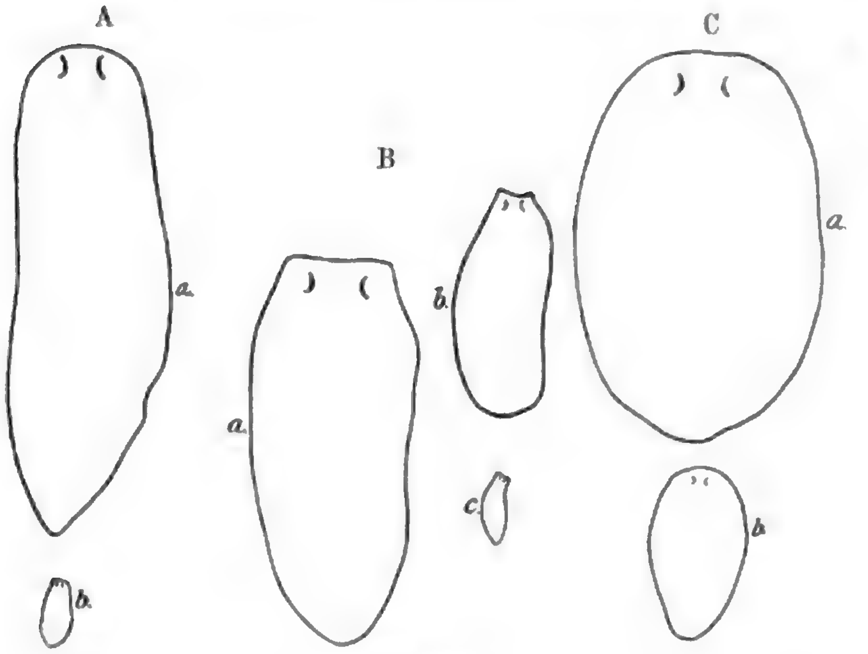


Fig. 34.



Fig. 35.

Fig. 34. A Dendrocoelum lacteum, B Planaria alpina, C Planaria torva in normaler Größe (a) und nach mehrmonatlichem Hungern (b, c). A, b $10\frac{1}{2}$ Monat, B, b etwa $8\frac{1}{2}$, B, c etwa $10\frac{1}{2}$, C, b etwa 11 Monate gehungert. Nach Berninger.

Fig. 35. Planaria alpina. A normales Tier, B nach längerem Hungern. Nach Berninger.

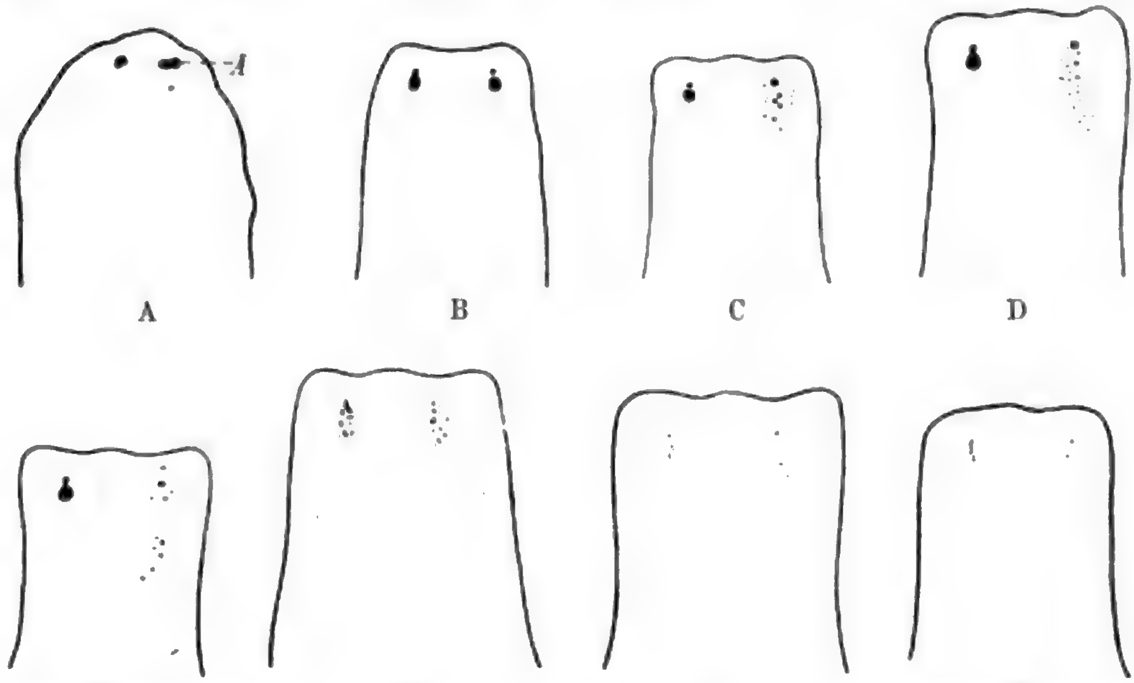


Fig. 36. Augen-Zerfall und -Schwund bei Dendrocoelum lacteum in verschiedenen Stadien des Hungerzustandes bis zu 9 Monaten. Nach Berninger.

Hydra. Wenn ausgewachsene Süßwasserpolypen unter geeigneten Vorsichtsmaßregeln einer längeren Hungerperiode ausgesetzt werden, was sie länger als 3 Monate ertragen, so können sie nicht nur ihr Volumen, sondern auch ihre Organisation in weitgehendstem Maße reduzieren (Fig. 38, 1 bis 8). Ersteres geht so weit, daß sie nach so langer Hungerzeit bis etwa zur Größe eines eben ausschlüpfenden Embryos herab gegangen sind, während ihre Organisation sogar eine noch einfachere ist. Die Tentakel verkürzen sich, werden knopfförmig und nach immer weitergehender Verkürzung schwinden sie schließlich ganz (Fig. 38, 1 bis 5), die Mundöffnung kommt zum Schluß und die Organisation vereinfacht sich soweit, daß der so reduzierte Polyp schließlich nur noch aus

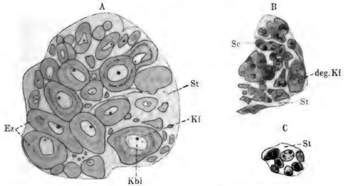


Fig. 37. Eierstock von Dendrocoelum lacteum. A bei normaler Beschaffenheit, B nach 7monatlichem, C nach 8monatlichem Hungern. Nach Berninger.

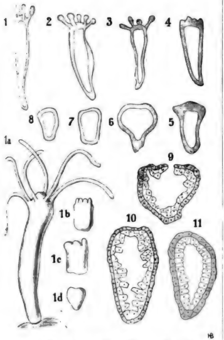


Fig. 38. Hydra unter Hungereinfluß. 1a Normale Hydra, 1 b bis 1 d nach 6-, 8- und 12wöchentlichem Hungern; 1 bis 8 die verschiedenen Stadien der Hungerwirkung, 9 und 10 Durchschnitte, 11 Planula. Nach Berninger.

den beiden Körperschichten besteht (Figur 38, 9 u. 10), welche kaum eine erheblichere Differenzierung zeigen, als sie bei der Planulalarve (Fig. 38, 11) vorhanden ist. Es wird kaum zu bezweifeln sein, daß es unter Anwendung der nötigen Geduld und Ausdauer gelingen würde, solche reduzierte Hydren wieder auf den früheren, normalen Zustand zurück zu bringen.

Bei solchem Verhalten, wie wir es hier von den Planarien und Hydren kennen lernten, hat man mit Recht von einer Umkehr der Lebensprozesse gesprochen (Driesch, Schultz), denn man sieht diese Organismen in der Tat von dem komplizierten zu einem sehr viel einfacheren Bau zurückkehren, wobei zum Teil ungefähr der umgekehrte Weg wie bei der Embryonalentwickelung eingehalten wurde (E. Schultz). Inwieweit es sich dabei um eine Entdifferenzierung des Zellenmaterials mit nachheriger Umdifferenzierung zu Zellen anderen Charakters handelt, oder aber um Entwickelung embryonaler Zellenkomplexe, die im Verborgenen vorhanden waren, ist eine bei den Tieren ungemein schwer zu entscheidende Frage, welche uns in ähnlicher Weise bei der Herkunft des Regenerationsmaterials schon mehrfach entgegentrat. Es liegt außerordentlich nahe, dabei wieder auf die Pflanzen zu verweisen, bei welchen in Verbindung mit den vorher erwähnten und anderen Vorgängen gewiß auch Reduktionsvorgänge eine Rolle spielen. Vor allem aber ist die Rückkehr zu einem indifferenten Zustand, die Spezietät der Zellen also, wohl geringer als bei den Tieren; außerdem aber sind allenthalben bildungsfähige Zellenkomplexe vorhanden und zur Ausgestaltung in verschiedenster Richtung befähigt. Nach Vöchting sind „in jedem größeren

oder kleineren Komplex lebendiger Zellen, zuletzt in jeder Zelle die inneren Bedingungen vorhanden, unter denen sich bei geeigneten äußeren Faktoren das Ganze aufbauen kann". Er wie Goebel legt auf die Aequipotentiabilität der Zellen ein großes Gewicht, wenn diese freilich auch wie bei den Tieren infolge der Anpassung an bestimmte Leistungen zurücktreten oder ganz verloren gehen kann (Goebel). Damit kommen wir aber wieder zu Fragen mehr entwickelungsphysiologischer Natur und verweisen deshalb auf Winklers und Herbsts Artikel über „Entwickelungsmechanik" (Bd. III).

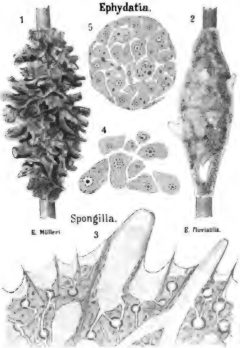


Fig. 39. 1 und 2 Spongillen auf Zweigstücken, 3 Durchschnitt eines oberflächlichen Körperteils, 4 isolierte Zellen, 5 Zellenaggregat.

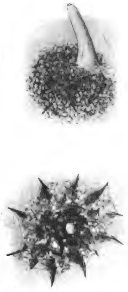


Fig. 40. Durch Dissoziation und Reunition erhaltene junge Spongillen. Nach K. Müller.

9. Regeneration kleinster Teilstücke, Regeneration durch Dissoziation und Reunition. Schon vorher war wiederholt die Rede davon, daß bei gewissen Tieren das Regenerationsvermögen außerordentlich weit geht und ungemein kleine Stücke des Körpers noch in der Lage sind, die verloren gegangenen Teile zu ersetzen, um schließlich wieder zu einem vollständigen Tier heranzuwachsen. In besonders weit gehendem Maße ist diese Fähigkeit bei den Süßwasserpolypen und bei den Planarien (Fig. 28) entwickelt, bei welchen Stücke von $^1/_{100}$ und $^1/_{200}$ des Volumens vom ausgebildeten Tier dieses wieder herzustellen vermögen. Ebenso sind manche Nemertinen außerordentlich regenerationsfähig und Stücke eines 25 bis 30 cm langen Tieres, welche nur 1 oder gar nur $^1/_2$ mm lang sind und wichtiger Organe wie des Darmes und Nervensystems entbehren, können trotzdem den ganzen Körper zur Ausbildung bringen (Dawydoff, Nußbaum und Oxner). Gewisse Ringelwürmer vermögen an Stücken von einigen wenigen Körperringen und sogar nur einem Segment nach vorn wie hinten ein Regenerat und somit die wichtigsten Körperteile neu zu

bilden, wie dies von Ctenodrilus und Lumbriculus aus deren natürlicher und künstlicher Teilung bekannt ist.

Bei solchen kleinen Teilstücken muß das Material für die Neubildung aus ihrem eigenen Zellenmaterial aufgebracht werden; mancherlei Verlagerungen, Umgestaltungen, Reduktionen und Umdifferenzierungen müssen in ihnen stattfinden, weshalb dieser Erscheinungen bereits in den vorhergehenden Abschnitten gedacht werden mußte. Aehnliches ist der Fall bei jenen erst in neuester Zeit bekannt gewordenen Vorgängen, die man als eine Dissoziation und Reunition des Zellenmaterials der Teilstücke bezeichnet und die uns ein noch bedeutend weitergehendes Herstellungsvermögen der betreffenden Organismen erkennen lassen. Die hier in Frage kommenden Beobachtungen sind zuerst an Schwämmen von H. V. Wilson angestellt worden, seine Versuche führten in dieser Beziehung zu ganz überraschenden Ergebnissen. Die Schwämme besitzen die Fähigkeit, aus recht kleinen Teilstücken die verloren gegangenen Teile zu regenerieren, doch war die von Wilson und K. Müller bei ihren so erfolgreichen Versuchen angewandte Methode eine äußerst radikale. Kleine, vom Schwamm abgetrennte Stückchen (Wilson experimentierte mit einem Meeresschwamm Microciona, Müller mit Süßwasserspongillen, Fig. 39) wurden zwischen den Fingern zerrieben und die Reste in einem mit Wasser gefüllten Gefäß abgespült. Die zerriebenen Teile breiten sich als wolkige Masse aus und setzen sich dann als dünne Schicht über dem Boden ab. Hier treten in nicht langer Zeit junge Schwämmchen auf, welche möglicherweise aus kleinen, noch zusammenhängenden Schwammstückchen hervorgegangen sein können, denn solche mögen, wenn auch in recht stark mitgenommenem Zustand, außer völlig zerriebenem Zellenmaterial gewiß noch vorhanden gewesen sein. Aber schon bei derartigen Versuchen ist zu bemerken, daß isolierte Zellen, welchen die Fähigkeit amöboider Bewegung zukommt, zu anfangs kleinen, sich später vergrößernden Zellenaggregaten zusammentreten (Fig. 39).

Letzteres Verhalten festzustellen, war nun die Hauptaufgabe der Versuche, zu welchem Zweck sie dahin modifiziert wurden, daß man die zerkleinerten Schwammstückchen völlig zerrieben durch feinste Gaze oder gar feine Leinwand hindurchdrückte und dafür sorgte, daß zusammenhängende Partien in der durchgedrückten Masse nicht mehr vorhanden waren, diese vielmehr aus völlig isolierten Teilen bestanden. Die mikroskopische Untersuchung lehrte, daß es isolierte Zellen waren, aus denen die Massen bestanden und daß sich diese zu Aggregaten vereinigten (Fig. 39), die ihrerseits aus ungefähr gleichartigen Zellen zusammengesetzt erschienen. Man möchte sie am ehesten mit einem Embryo oder einer Schwammlarve vergleichen und wie

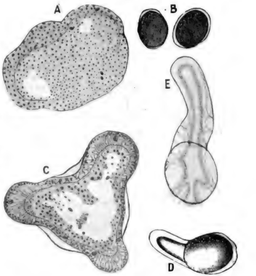


Fig. 41. Pennaria. A Restitutionsmasse nach 17 Stunden, B nach 2 Tagen, Trennung in Ekto- und Entoderm, C bis E 3 Tage alte Massen, zum Teil mit Auswüchsen und Perisark. Nach H. V. Wilson.

aus dieser geht aus einem solchen Zellaggregat ein junger, mit der vollständigen Organisation ausgestatteter, zunächst noch sehr kleiner Schwamm hervor (Fig. 40).

Die Schwämme sind ganz besonders nieder stehende Tiere und wenn auch die Fähigkeit zu dem geschilderten Wiederherstellungsvermögen des Ganzen sehr überraschend ist, ließe sie sich aus dieser Tatsache vielleicht noch am ehesten verstehen. Wilson war jedoch in der Lage, bei seinen weiter fortgesetzten Versuchen auch mit

zwar ebenfalls einfach organisierten, aber doch immerhin höherstehenden Tierformen, nämlich mit Coelenteraten (Hydroidpolypen und Anthozoen): Eudendrium, Pennaria und Leptogorgia, entsprechende Erfolge zu erzielen. Er beschreibt und erläutert durch eine große Zahl von Abbildungen wie nach ähnlicher Ausführung der Versuche die isolierten Zellen oder Zellengruppen sich zu größeren Aggregaten vereinigen und diese zu unregelmäßig geformten Zellenmassen werden (Fig. 41), aus denen sich die kleinen Polypen entwickeln, wie bei jenen Versuchen der junge Schwamm (Fig. 39 u. 40). Die jungen Polypen fangen an zu knospen (Fig. 41), werden also zu einer kleinen voneinander getrennten Teilen das Ganze wiederherzustellen.

10. Verschiedene Regenerationsfähigkeit einzelner Körperteile, Wiederholung und Energie der Regeneration. Soweit die Frage nach dem Regenerationsvermögen der verschiedenen Körperregionen untersucht ist, zeigte sich, daß hierin gewisse Differenzen bestehen, welche zum Teil von der größeren Exponiertheit der betreffenden Partien, zum Teil aber davon abhängen, daß in ihnen die Differenzierung eine bedeutendere und dadurch ihr Ersatz schwieriger geworden ist. Daß gewisse, dem Verlust leichter ausgesetzte Teile des Körpers, wie der Schwanz der Reptilien oder die Glied-

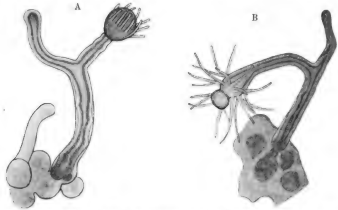


Fig. 42. Eudendrium, A und B Restitutionsmassen mit einem Polypen und mehreren anderen Auswüchsen. Nach H. V. Wilson.

Kolonie und erfüllen somit alle Bedingungen, die man von einem normalen Hydroidpolypen erwarten kann.

Bei allen diesen Versuchen drängt sich die Frage auf, welche Arten von Zellen es sind, die sich zur Lieferung des neuen Organismus zusammenfinden. Es könnten Zellen der verschiedenen Gewebsarten sich vereinigen, ohne daß sich dies bei der Lösung aus ihrem Verband ohne weiteres feststellen ließe; andererseits könnte aber auch eine Rück- und Umdifferenzierung von Zellen stattfinden oder embryonal gebliebene Zellen könnten die Hauptrolle bei diesen Restitutionsvorgängen spielen. Dies sind Fragen, welche sich durch die Beobachtung kaum oder nur mit größter Schwierigkeit werden entscheiden lassen. Hier muß es zunächst genügen, die Fähigkeit des Organismus festzustellen, aus derartig geringen, maßen der Salamander, verhältnismäßig leicht wieder hergestellt werden können, wurde schon vorher besprochen. Ihnen würden die Extremitäten vieler Gliedertiere (Krebse, Spinnentiere, Insekten) anzuschließen sein, bei denen ähnlich wie beim Eidechsenschwanz sogar besondere Vorkehrung für die Erleichterung des Ablösens getroffen sein können.

Bei den so außerordentlich regenerationsfähigen Hydren fehlt den offenbar in der Differenzierung schon zu weit vorgeschrittenen Tentakeln die Fähigkeit, die verlorenen Körperteile zu ersetzen, während diese sonst ungefähr allen Körperpartien eigen ist. Bei den nahe verwandten stockbildenden Hydroidpolypen sind einzelne Partien des Stockes vor anderen, etwa die apikalen vor den medialen und basalen Regionen, durch die Produktionsmöglichkeit neuer Köpfchen

ausgezeichnet. Die ebenfalls mit einem erstaunlichen Regenerationsvermögen begabten Planarien lassen dieses doch an augenscheinlich differenzierten Gegenden, wie äußersten Kopf- und Schwanzstücken oder solchen aus der Mundgegend etwas zurücktretend erscheinen, abgesehen davon, daß die betreffenden Teile am Körper selbst leicht ersetzt werden können. Aehnliches gilt für die Anneliden, bei denen abgelöste Kopf- und Schwanzstücke weniger regenerationsfähig sind, als solche aus der Körpermitte. Bei Regenwürmern werden zwar außerordentlich lange und segmentreiche Schwanzregenerate gebildet, aber nach vorn hin ist ihre Regenerationsfähigkeit weit beschränkter, indem ein neuer Kopf nur nach Verlust verhältnismäßig weniger (etwa 10, höchstens 12 bis 15) vorderer Körpersegmente neu gebildet wird.

Manche Körperteile können wiederholt regeneriert werden. Bekannte Beispiele dafür sind die Salamanderbeine, die schon von Spallanzani nicht weniger als 6mal nacheinander entfernt und jedesmal neu gebildet wurden, ebenso der Schwanz der Molche. Die Schwanzspitze dieser Tiere kann anscheinend beliebig oft entfernt und wieder neu gebildet werden. Nach Ribberts Versuchen läßt sich die Epidermis am Kaninchenohr mehr als 100 mal abkratzen und wird stets wieder ergänzt. Bei Ringelwürmern hat man mehrmals aufeinander folgende Kopf- und Schwanzbildung festgestellt, so wird bei Tubifex das Kopfende 3- bis 4-, bei Lumbriculus sogar 8- bis 9mal, das Schwanzende bei ersterem Wurm 10- bis 11-, bei letzterem 14mal neugebildet (C. Müller). Bemerkenswert ist dabei, daß Schwanzregenerate dieser Würmer von ihnen abgetrennt einen neuen Kopf bilden, so daß vom Ausgangsindividuum nichts mehr übrig ist und sie diesem gegenüber etwas ganz Neues darstellen (Driesch, C. Müller), wie dies Driesch in ähnlicher Weise zuerst für abgetrennte Regenerate der (ebenfalls wiederholt regenerierenden) Ascidien feststellte.

Was die Energie der Regeneration anbetrifft, so pflegt sie mit der Größe des Verlustes zu steigen; jedenfalls ist dies für den Ersatz der verlorenen Teile recht günstig. So erfolgt bei Krebsen die Regeneration zweier Scheren oder Beine verhältnismäßig rascher, als wenn nur eines dieser Glieder weggenommen wurde. Ebenso ist der Verlauf der Regeneration ein energischerer, wenn bei einem Schlangenstern mehrere Arme entfernt wurden, als wenn dies nur mit einem geschah, der dann in langsamerem Tempo ersetzt wird. Bei Regenwürmern werden in Verlust geratene verhältnismäßig geringe Partien des hinteren Körperendes nur langsam, größere segmentreiche Stücke hingegen weit rascher regeneriert; an kleinen, aus einer geringen Zahl von Körperringen bestehenden Teilstücken sieht man in kurzer Zeit lange Regenerate hervorknospen (Fig. 29). Diese können sogar länger und segmentreicher werden als das verloren gegangene Körperende, sodaß eine derartig energisch verlaufende Regeneration über ihr Ziel hinausschießt. Auf die Erscheinung einer derartigen Ueberproduktion wird im nächsten Abschnitt einzugehen sein.

11. Unvollständige und Superregenerate, Doppel- und Mehrfachbildungen. Aus mancherlei, oft kaum festzustellenden Gründen erfährt das Regenerat eine unvollständige oder ungenaue Ausbildung, sei es, daß die Regenerationsfähigkeit des betreffenden Tieres überhaupt nicht groß oder das betreffende Teilstück zu klein ist, sei es, daß die betreffende Körperregion für die Ausführung der Regeneration ungeeignet ist, letztere zu früh abschloß, indem die Bildungsvorgänge nicht weiter geführt wurden (Driesch), einzelne Teile in verschiedener, nicht zusammenpassender, eher gegeneinander wirkender Weise ausgeführt wurden (Tornier) oder irgendwelche sonstigen inneren, aber auch manche äußeren Faktoren hinzu kommen, welche die normale Ausgestaltung des Regenerats verhindern. Zuweilen ist die Unregelmäßigkeit äußerlich an dem anscheinend ganz normalen Regenerat nicht zu erkennen; die Untersuchung der Struktur ergibt jedoch, daß diese häufig von der Norm recht bedeutend abweicht, wie es bezüglich der einzelnen Bestandteile (Skelett, Muskeln, Nerven, Gefäßen usw.) nicht selten bei regenerierten Körperanhängen (Schwanz und Extremitäten der Wirbeltiere und Arthropoden) der Fall ist. Häufig reicht das Material für die Ausführung des Regenerats nicht aus und es gerät zu klein, die Ausgestaltung einzelner Teile unterbleibt oder erfolgt unregelmäßig, sodaß die Gestalt des Ganzen davon beeinflußt wird, sodann verkrümmt, mit Einbuchtungen und Auswüchsen versehen, kurz recht unregelmäßig erscheint.

Gerade derartiges ist häufig an den regenerierten Gliedmaßen der Wirbel- und Gliedertiere zu bemerken. Zuweilen erscheinen unvollständig regenerierte Extremitäten ziemlich regelmäßig, lassen aber dennoch das Fehlen einiger Glieder erkennen (Fig. 43). Unter Umständen wird die Gestalt notdürftig wieder hergestellt, wobei Neubildungen nur in sehr beschränktem Maße oder so gut wie gar nicht stattfinden. Hierfür erwiesen sich die Medusen als günstige Objekte, welche in zwei oder mehrere Teilstücke zerschnitten einen Zusammenschluß der Wundflächen bewerkstelligten und auf diesem Wege eine Abrundung der Gestalt, sowie deren ziemlich

vollständige Wiederherstellung erzielten. Der Körper zeigt dann eine viel geringere Größe und zuweilen einen weitgehenden Mangel innerer Organe, sowie anderer Körperteile (Mundstiel, Tentakel, Radiärkanäle usw.).

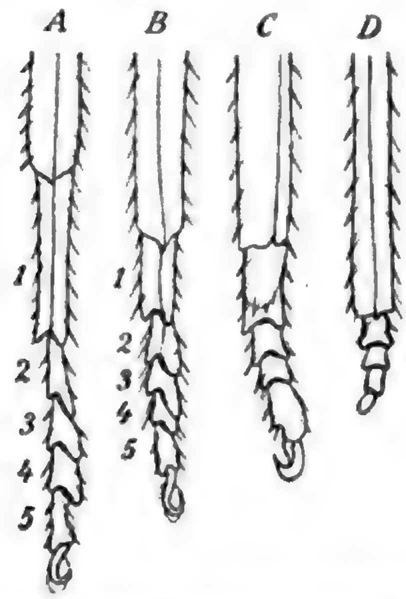


Fig. 43. A „Unterschenkel" (Tibia) und 5-gliederiger Fuß einer Stabheuschrecke, B ziemlich gut regeneriert, C regeneriert, nur 4gliedrig, D nur noch 3gliedrig. Nach Godelmann.

Der unvollständigen Regeneration steht diejenige gegenüber, bei welcher nicht zu wenig, sondern zu viel gebildet wird, wie dies von besonders energisch verlaufenden Regenerationsprozessen schon vorher erwähnt wurde. Beim Ueberfluß von Regenerationsmaterial wohl infolge besonders reicher Ernährung der betreffenden Partien, kann eine Ueberproduktion stattfinden, welche dann unter Umständen zur Bildung sehr umfangreicher, in Größe und Gestalt von der Norm abweichender Regenerate führt. In dieses Gebiet fallen die verschiedenartigsten Mißbildungen, die ungefähr aus allen Tiergruppen bekannt sind und deren Zahl Legion ist, so daß sie hier nur ganz kurz behandelt werden können. Ueberdies sind sie zum großen Teil embryonalen Ursprungs und gehen auf andere Ursachen zurück, so daß sie hier nicht alle in Betracht kommen. Einige charakteristische Doppelbildungen, wie sie in der Embryonalentwickelung, aber auch bei Verletzungen zustande kommen können, sind in Figur 44 dargestellt. Auf experimentellem Wege lassen sich Doppelbildungen durch Anbringen von Wunden erzielen, welche ein zweifaches Regenerationszentrum schaffen, also etwa durch Spalten des Vorder- und Hinterendes am Körper von Polypen, Würmern, besonders Planarien, aber auch noch an Embryonen von Wirbeltieren. Während derartige Versuche sich bei niederen Tieren noch im ausgebildeten Zustand ausführen lassen, gewähren sie bei höheren Tieren nur noch im Embryonalzustand Aussicht auf Erfolg. Aehnliches gilt für das Spalten der Extremitäten, bei welchen ebenfalls solche Doppel- und Mehrfachbildungen zustande kommen. Einige Beispiele dürften diese Verhältnisse am besten erläutern. Durch geeignetes Anbringen von Wunden in der Nähe des Hinterendes sehen wir eine Spaltung des Eidechsenschwanzes (Fig. 45), eine Mehrfachbildung des Beckens und der Hintergliedmaßen bei einer Kröte (Fig. 46), sowie eine solche des hinteren Körperendes bei einem Ringelwurm (Fig. 47) erzielt. Ebenfalls auf experimentellem Wege durch entsprechende Behandlung der Embryonal-

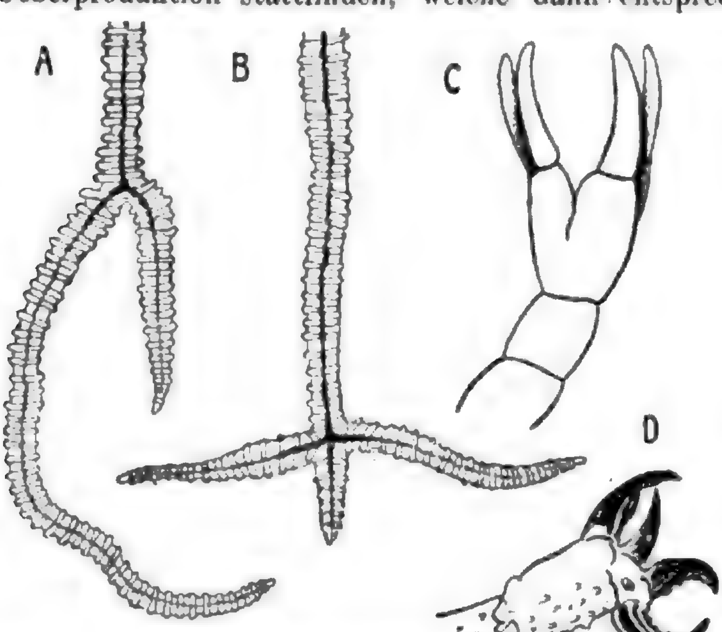


Fig. 44. Gespaltene Medusententakel (A, B) und Krebsscheren (C, D). Nach Hargitt, Zeleny und Przibram.

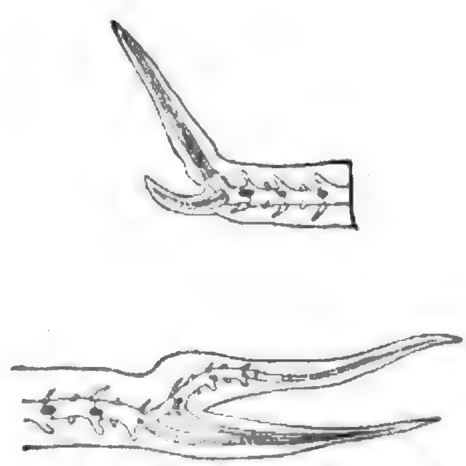


Fig. 45. Zwei durch Spaltung erzeugte Doppelschwänze der Eidechse. Nach Tornier.

anlagen konnte eine Verdoppelung des Kopfes bei Amphibien und Reptilien hervorge-

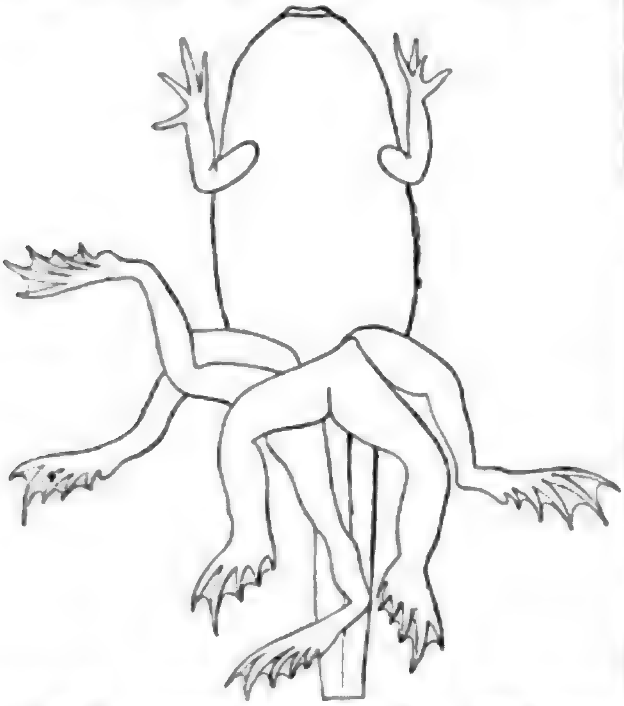


Fig. 46. Mehrfachbildung von Becken und Hintergliedmaßen bei der Larve von Pelobates. Nach Tornier.

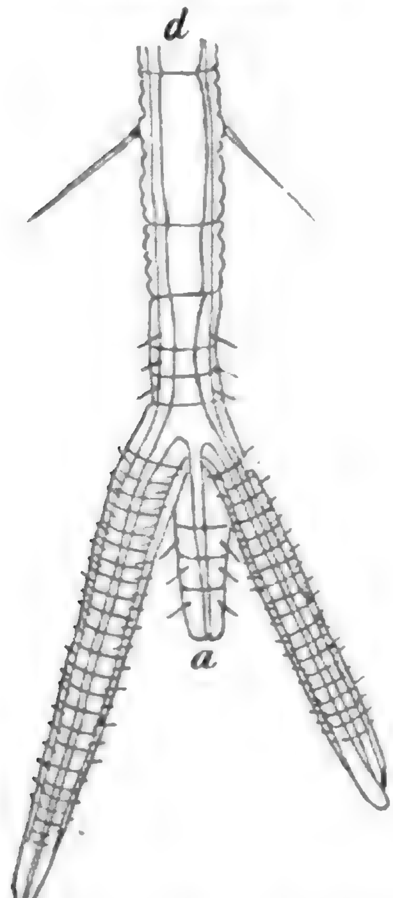
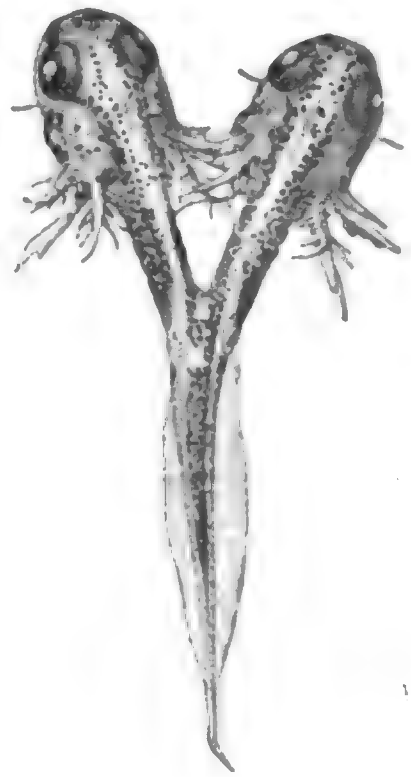


Fig. 47. Dreifachbildung des Hinterendes von Tubifex. Nach C. Müller.

bracht werden (Fig. 48 u. 49) und verschiedenartige überzählige Bildungen lassen sich durch geeignete Schnittführung an den Gliedmaßen von Arthropoden und Vertebraten hervorbringen (Fig. 50). Die Art der Schnittführung ist überhaupt sehr wichtig, wie besonders die an niederstehenden Tieren, vor



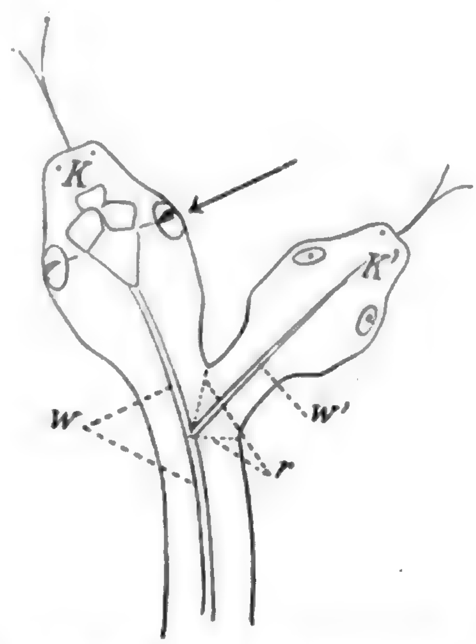


Fig. 48 und 49. Auf experimentellem Wege erzeugte Kopfdoppelbildung von Triton (48) und Kopfdoppelbildung einer Schlange (49). Nach Spemann und Tornier.

allem Planarien, ausgeführten Versuche erkennen lassen. An ihrem außerordentlich regenerationsfähigen Körper wurden nach vorn oder nach hinten gerichtete Schnitte so angelegt, daß die teilweise abgetrennten

Körperpartien imstande waren, an sich einen neuen Kopf zur Ausbildung zu bringen und somit ein ziemlich vollständiges Tier zu erzeugen, dieses wäre vom übrigen Körper abgelöst, allein lebensfähig; aber die betreffenden Stücke können auch, ohne eine solche Selbständigkeit zu gewinnen, wieder in den übrigen Körper einbezogen werden, um wieder mit ihm zu verschmelzen. Durch diese Versuche wird das Verhältnis des Körpers zu seinen einzelnen Teilen in höchst instruktiver Weise erläutert. Ist er nämlich in der Lage, seinen Einfluß auf die Neubildungen auszuüben, so entsteht ein einheitliches Ganze; kann dieser Einfluß jedoch nicht zur vollen Geltung gelangen, so vermögen die einzelnen Teile die

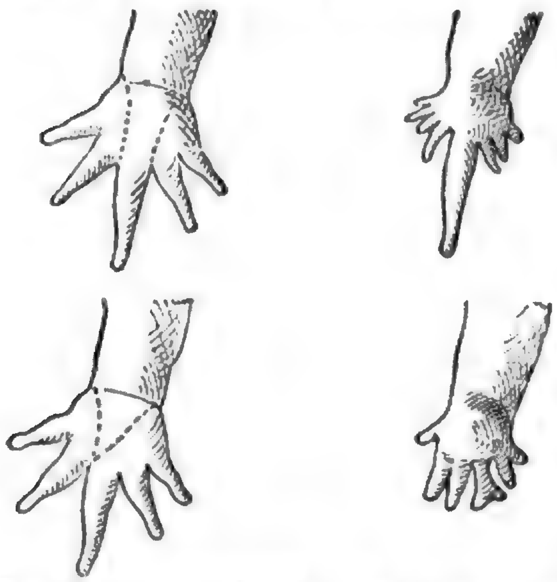


Fig. 50. Hintergliedmaßen von Triton, durch die (an den punktierten Linien) geführten Schnitte zur Polydactylie veranlaßt. Nach Tornier.

ihnen innewohnende Fähigkeit zur Hervorbringung anderer Körperpartien durchzusetzen, woraus dann eine von der normalen Gestalt abweichende Mehrfachbildung hervorgeht. In weitergehendem Maße sind Versuche mit derartigen und verwandten Zielen an Embryonen der verschiedensten Tiere auf entwickelungsmechanischem Gebiet unter Anwendung recht verschiedenartiger Mittel ausgeführt worden und haben oft zu ebenso wichtigen wie überraschenden Ergebnissen geführt (vgl. den Artikel „Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Tiere").

12. Regeneration und Polarität des Körpers, Umkehrung der Polarität, Heteromorphosen. Auf Grund der bisher besprochenen Beobachtungen und Versuche wurde es fast als selbstverständlich und mit zu dem Wesen der Regeneration gehörend betrachtet, daß bei Verlust gewisser Körperteile diese nach Möglichkeit in der früheren Form wiederhergestellt werden. Nach derselben Richtung entwickeln sich im allgemeinen dieselben Körperteile, die schon vor der Verletzung dort vorhanden waren. Es ist dies eine Regel, welche nicht nur für den tierischen, sondern auch für den pflanzlichen Körper gilt. Die Organismen zeigen im allgemeinen eine bestimmte Polarität ihres Körpers und da diese Erscheinung schon bei den meisten Einzelligen (Pflanzen und Tieren) in ausgesprochener Weise zu beobachten ist, so lag es nahe, die Polarität des vielzelligen Pflanzen- und Tierkörpers auf diejenige der Zelle zurückzuführen. Auf diese Frage ist zumal vonseiten der Botaniker großes Gewicht gelegt worden, wie die Pflanzen infolge ihres aufrechten Wachstums für Polaritätsversuche überhaupt besonders geeignet sind. Eine große Rolle spielten dabei die von älteren wie neueren Botanikern unternommenen Versuche, die Polarität umzukehren, d. h. die Pflanze zu veranlassen, am Scheitelpol diejenigen Teile zur Ausbildung zu bringen, welche sonst am entgegengesetzten (basalen) Pol auftreten, also möglichst am Sproßpol Wurzeln und am Wurzelpol Sprosse zu treiben. Durch umgekehrte Orientierung dafür geeigneter Pflanzenteile (als besonders günstige Objekte erwiesen sich Weidenzweige), gelang es anscheinend, die Polarität umzukehren und an den betreffenden Pflanzen dort Wurzeln hervorzurufen, wo sich eigentlich Sprosse bilden sollten und umgekehrt (Vöchting, Goebel, Klebs, Winkler u. a.). Hier kann weder auf die an verschiedenartigen höheren und niederen Pflanzen vorgenommenen Versuche, noch auf die ihnen hinsichtlich der vermeintlichen Umkehrung der Polarität zuteil gewordenen recht verschiedenen Deutungen eingegangen werden (man vgl. die zusammenfassenden Bücher von Korschelt und Morgan u. a., sowie Winklers Artikel über „Entwickelungsmechanik der Pflanzen").

Nach den an Pflanzen angestellten Versuchen lag es außerordentlich nahe, auch bei den Tieren die Polarität des Körpers und die Möglichkeit ihrer Umkehr zu prüfen. Letztere gelang leichter, als vorauszusehen. Bei J. Loebs bekannten Versuchen, die von anderen Experimentatoren mit anderen Objekten und in anderer Ausführung wiederholt wurden, gelang es an umgekehrt in den Sand gesteckten Stammstücken von Hydroidenstöckchen am apikalen Pol Wurzelausläufer, an dem jetzt nach oben gerichteten basalen Pol hingegen Zweige hervorzurufen, also ähnliche Resultate wie bei den Pflanzenversuchen zu erzielen. Diese sind allerdings bei den Tieren insofern noch bemerkenswerter und jedenfalls eindeutiger, als ihnen keine Adventivknospen wie den Pflanzen

zur Verfügung stehen. Die an beiden Enden freien Stammstücke eines anderen Hydroidpolypen (Tubularia) vermögen an diesen beiden Enden, d. h. sowohl am aboralen wie am oralen Pol ein Köpfchen zu bilden (Fig. 51). Derartige Neubildungen an Stellen, wohin sie nicht gehören, nannte man Heteromorphosen (J. Loeb). Als Mißbildungen verschiedenster Art sind sie von höheren und niederen Tieren schon lange bekannt, ohne daß man ihnen früher eine so große Bedeutung beilegte, wie sie jetzt aus theoretischen Gründen beanspruchen. Infolge des großen Interesses, welches neuerdings wieder den Regenerationsversuchen entgegengebracht wurde, hat man diese bei verschiedenen Tieren auch zur Prüfung der Polaritätsfrage verwendet; man fand dabei, wie zu erwarten war, daß sich zumal weitergehende Abweichungen von der Körperpolarität sowohl bei niederen als auch bei höher organisierten Tieren finden. Abgesehen von den schon erwähnten Hydroidpolypen (und manchen Anthozoen), bei denen sich unter geeigneter Behandlung auch an kurzen Stücken normale und heteromorphe Köpfe erzielen lassen, die dann dicht aneinander liegen, sind ähnliche Bildungen auch bei Planarien hervorzurufen (Fig. 52). Bei ihnen sieht man nach entsprechend angebrachten Verletzungen Köpfe an den verschiedensten Stellen des Körpers hervorwachsen (Fig. 52 A); sie können direkt nach hinten gerichtet sein (Fig. 52 B) und beiderseitig an sehr kleinen Stücken des Körpers, wie auch an Kopfstücken sehr geringen Umfangs (Fig. 52, C und D) entgegengesetzt dem normalen Kopf auftreten (Fig. 52, E und F), wie aus den zahlreichen Versuchen von Voigt, Morgan, van Duyne, Child u. a. hervorgeht. Heteromorphosen werden auch bei anderen Tieren beobachtet, so wächst unter Umständen bei Regenwürmern, denen ein umfangreiches Stück des Vorderkörpers genommen wurde, anstatt eines neuen Vorderendes ein langes segmentreiches Schwanzende von der Wundstelle aus; ebenso treten Heteromorphosen, wenn auch nicht in so weit gehendem Maße, bei noch höher stehenden Tieren, Arthropoden und Tunicaten, ja bis zu einem gewissen Grade auch noch bei niederen Wirbeltieren auf.

Von besonderem Interesse ist die auf dem Wege der Transplantation erreichte Umkehrung der Polarität, die zur Bildung von Heteromorphosen führt, durch welche die gestörte Körpereinheit wiederhergestellt wird. Zwei mit den abgeschnittenen Vorderenden vereinigte Hydren können an der Stelle, wo sodann das Hinterende des einen entfernt wurde (Fig. 53, A und B), also am umgekehrten Ende ein neues Vorderende mit Mund und Tentakeln bilden (Fig. 53 C). Wenn man mit zwei Regenwürmern entsprechend verfährt, d. h. sie ebenfalls mit den abgeschnittenen Vorderenden vereinigt und dann von dem einen der beiden Würmer nur ein Stück stehen läßt (Fig. 54, A und B), so bildet sich unter Umständen ein neuer, also in Wirklichkeit heteromorpher Kopf aus (Fig. 54 C). Der so entstandene vollständige Wurm ist im Besitz eines ungefähr

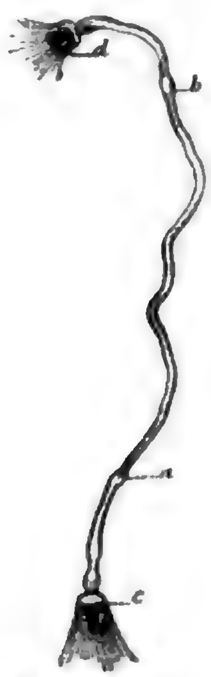


Fig. 51. Bei a und b durchschnittenes Stammstück von Tubularia mit den neuen Köpfchen bei c und d. Nach J. Loeb.

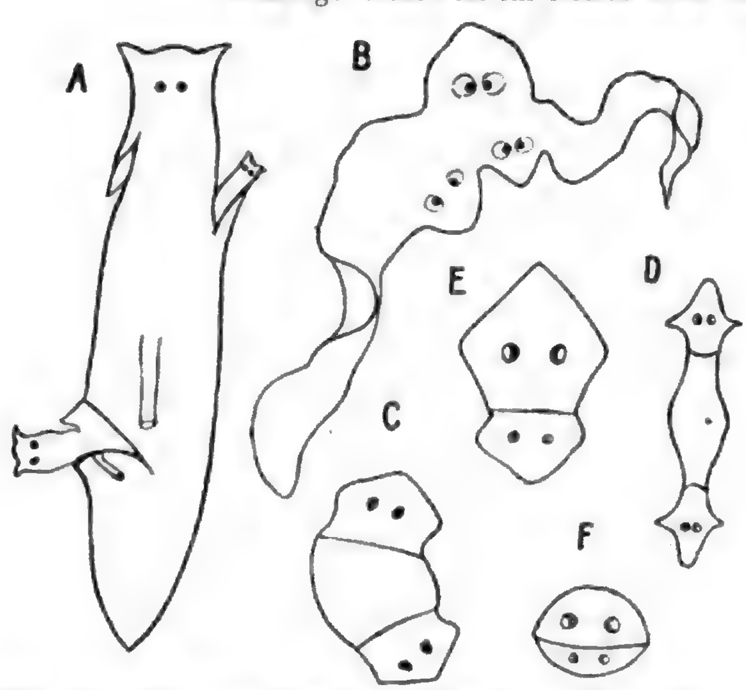


Fig. 52. Heteromorphosen an Planarien. Nach Voigt, Van Duyne, Morgan und Child.

normal gebauten Kopfes mit Mund, Vorderdarm, Gehirn usw (Fig. 55), er kann nach den neueren Untersuchungen von Ruttloff und Leypoldt zur Nahrungsaufnahme gebracht werden und recht lange leben. In ähnlicher Stelle gehörend, dennoch dem Ganzen einheitlich anfügen konnte. Damit wird die wichtige Frage nach der Möglichkeit einer Umkehrung der Polarität und dem Zustandekommen der Heteromorphosen berührt, die



Fig. 53. Heteromorpher Kopf nach Transplantation bei Hydra.

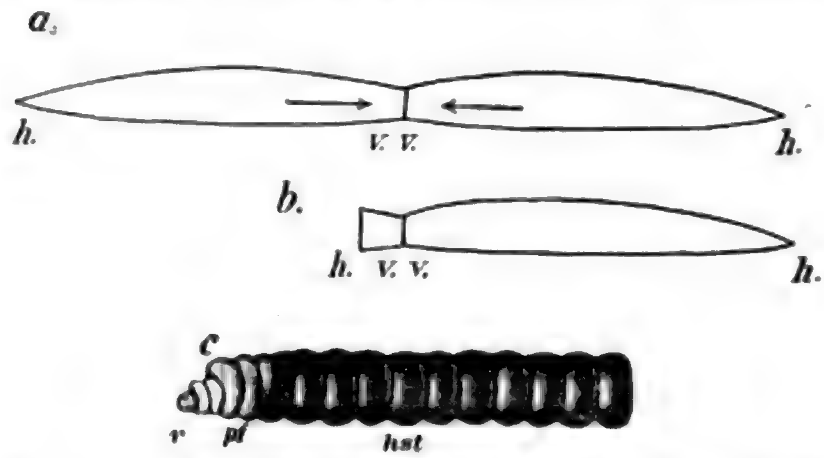


Fig. 54. a Schema zweier mit dem Vorderende vereinigter Regenwürmer, b das eine Stück abgeschnitten, c Bildung des neuen Kopfes. v vorn, h hinten, hst Hauptstück, pf Pfropfstück, r Regenerat (neuer Kopf).

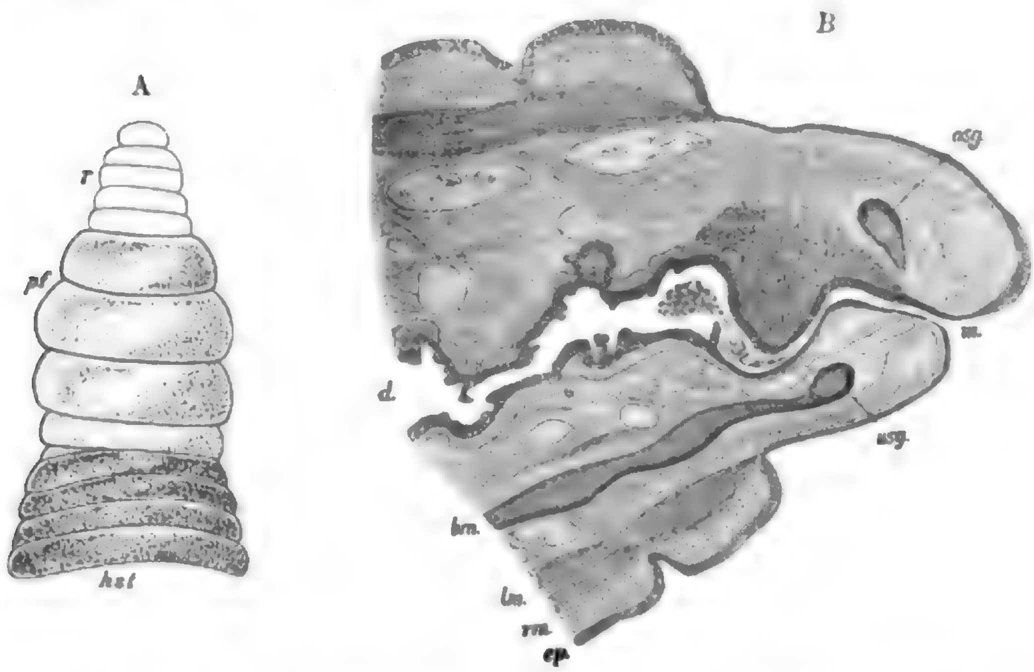


Fig. 55. A Transplantat eines Regenwurms mit regeneriertem heteromorphem Kopf. hst Hauptstück, pf Pfropfstück, r Regenerat. B Längsschnitt durch das Pfropfstück und das Regenerat, m Mund, d Darm (im Darm Nahrungspartikel), bm Bauchmark, lm Längsmuskulatur, rm Ringsmuskulatur, ep Körperepithel, osg oberes, usg unteres Schlundganglion.

Weise ließen sich durch Vereinigung von Froschlarven mit den angeschnittenen Hinterenden und Abtrennung des einen Stückes infolge von Bildung einer Schwanzheteromorphose ungefähr vollständige Tiere erzielen. In diesen Fällen scheint also von dem großen Komponenten der Transplantation ein bestimmender Einfluß auf die Ausbildung des Regenerats ausgeübt worden zu sein, so daß dieses sich, obwohl nicht eigentlich an diese leider bisher nicht in befriedigender Weise zu beantworten war: vielleicht ist man auch hier wie bei den Pflanzen genötigt, auf die den betreffenden Organismus zusammensetzenden Zellen und ihre Struktur zurückzugehen.

An dieser Stelle muß noch eines besonders merkwürdigen Verhaltens gedacht werden, weil es zu andersartigen Erscheinungen hinüberführt. Es sind die von C. Herbst durch

seine höchst erfolgreichen Versuche an höheren Krebsen erzielten eigenartigen Heteromorphosen. Nach Abschneiden eines der beiden Stielaugen wurde dieses durch ein neues Auge ersetzt, wurde aber das Auge mitsamt dem Stiel und den in ihm gelegenen Augenganglien entfernt, so entstand an Stelle des Auges ein Fühler (Antenne). Es sind hier also gewisse Beziehungen des Regenerationsverlaufs zum Zentralnervensystem zu erkennen, bezüglich deren auf Herbsts eigene Darstellung in seinem Artikel „Entwickelungsmechanik“ dieses Werkes verwiesen sei. Hier interessiert noch eine mit dem Ergebnis dieser Versuche in Verbindung gebrachte Frage, die auch in anderer Beziehung aufgeworfen werden mußte, nämlich die nach der Ausgestaltung der Regenerate im Hinblick auf die Abstammung der betreffenden Tiere.

13. **Atavismus in der Regeneration.** Knüpfen wir an die Herbstschen Versuche der Augenregeneration bei Decapoden an, so drängt sich die Frage von selbst auf, wie es kommt, daß an Stelle des Auges gerade eine Antenne gebildet wird. Es lag dabei ungemein nahe, an die verschiedentlich diskutierte Auffassung von der Extremitätennatur der Stielaugen und weiter an einen Rückschlag zu denken, welcher bei Gelegenheit der Regeneration wieder hervortritt. Ist auch die Wahrscheinlichkeit einer solchen Annahme im ganzen recht gering, so war es immerhin naheliegend, sie aufzuwerfen und zwar schon deshalb, weil die Erklärung dieses merkwürdigen Verhaltens an und für sich auf Schwierigkeiten stößt.

Einen Regenerationsverlauf, den man geneigt war durch Atavismus zu erklären, trifft man auch bei anderen Tieren, besonders bei verschiedenen Gliedertieren an. So regenerieren die Krebse ihre Scheren in einer Form, welche der gewöhnlichen unter Umständen nicht recht entspricht, sondern vielmehr derjenigen der Scheren anderer, als phylogenetisch älter angesehener Krebse gleicht, so daß man hierbei ebenfalls an einen Rückschlag denken möchte. Dasselbe gilt für die verschiedentlich beobachtete Tatsache, daß die Füße der Insekten bei der Regeneration eine geringere Zahl von Gliedern als beim normalen Verhalten zeigen, was man ebenfalls als eine Rückkehr auf den phylogenetisch älteren Zustand angesehen hat. Das gleiche gilt für die Reduktion der Krallenzahl von 3 auf 2 bei der Regeneration der Spinnenfüße, aber man wird sich bei allen diesen Tatsachen nicht verhehlen dürfen, daß eine ungenaue und unvollständige Ausführung der Regenerate, wie sie vorher besprochen wurde, dabei leicht zu unrichtigen Deutungen führen kann. Auffallender ist es schon, wenn das Regenerat vollständiger als die verloren gegangenen Teile ausfällt und mit früheren Stadien der Phylogenie übereinstimmt, obwohl allerdings auch dabei eine zufällige Ueberproduktion, wie wir sie ebenfalls vorher kennen lernten, beteiligt sein könnte. Ein Beispiel dafür liefert die bekannte marine Nacktschnecke Tethys, bei welcher die in Verlust geratenen einfachen Rückenanhänge nicht in dieser Form, sondern in Gestalt verzweigter Anhänge wie bei anderen, vermutlich phylogenetisch älteren Gastropoden neu gebildet werden. In entsprechender Weise hat man das Auftreten eines fünften Fingers bei der Regeneration der Amphibienhand als Rückschlag auf den ursprünglichen fünffingerigen Zustand angesehen. Dabei darf aber nicht übersehen werden, daß gelegentlich auch mehr als 5 Finger gebildet werden, also eine zweifellose Ueberproduktion stattfindet und andererseits auch weniger, nämlich nur 2 oder 3 Finger zur Ausbildung kommen. Andere Erscheinungen, welche man im Sinn der Phylogenie verwerten zu können glaubte, können hier nicht mitgeteilt werden, doch sind die bisher bekannt gewordenen Tatsachen im ganzen kaum ausreichend, um sichere Schlüsse daraus ziehen zu können.

14. **Regeneration und Fortpflanzung, Selbstzerstückelung (Autotomie), die Regeneration als Anpassungserscheinung.** Mit der ungeschlechtlichen Fortpflanzung durch Teilung, welche darin besteht, daß ein Tier, gleichviel ob ein einzelliges oder mehrzelliges, sich durchschnürt und beide Teilstücke sich zu einem neuen Tier ergänzen, sind notwendigerweise Regenerationsvorgänge verbunden. An dem einen Teilstück muß ein neues Hinterende, an dem anderen ein neues Vorderende gebildet werden. Je nachdem, ob dies vor oder nach dem eigentlichen Teilungsakt (der Durchtrennung) geschieht, verlaufen diese Vorgänge in verschiedener Weise und im Artikel „Fortpflanzung der Tiere“ wird deshalb zwischen Paratomie und Architomie, Teilung mit vorhergehender und nachfolgender Regeneration unterschieden; bezüglich dieser und der auch bei der Fortpflanzung durch Knospung auftretenden Regenerationsvorgänge sei auf den genannten Artikel verwiesen.

Wegen der engen Verbindung zwischen den Vorgängen der Regeneration und der ungeschlechtlichen Fortpflanzung lag der Versuch sehr nahe, die letzteren auf die ersteren zurückzuführen. Anfangs konnten vielleicht nur geringfügigere Teile des Körpers ersetzt werden, dann bildete sich diese Fähigkeit weiter aus und umfangreichere Teile, die verloren gegangen waren, wurden wieder ergänzt. Wir wissen, daß bei manchen Seesternen ein abgelöster Arm in der Lage ist,

die Scheibe und die 4 anderen Arme neu zu bilden und daß bei ihnen sogar eine spontane Ablösung der Arme und deren Ergänzung zu einem vollständigen Individuum beobachtet wird. In ähnlicher Weise kann der Körper mancher Ringelwürmer infolge äußerer Einflüsse in einzelne Stücke zerfallen, von denen jedes für sich wieder zu einem ganzen Tier heranzuwachsen vermag. Hier erscheint in der Tat der Unterschied zwischen Regeneration und ungeschlechtlicher Fortpflanzung stark verwischt und insofern ohne willkürlichen Eingriff aus einem Individuum deren mehrere entstehen, entspricht der Vorgang in dieser Hinsicht den an einen Fortpflanzungsakt zu stellenden Anforderungen Der Nachdruck wird hierbei unwillkürlich auf den freiwilligen Vollzug der Teilung gelegt, denn die Erzielung einer größeren Zahl von Individuen aus einem Tier ist bei Infusorien, Polypen, Planarien, Nemertinen, Anneliden, Seesternen u. a. durch die schon vorher eingehender besprochene künstliche Zerteilung zu ermöglichen. Bei den genannten Tieren ist es nicht besonders schwierig, aus einer Anzahl auf künstlichem Wege hergestellter Teilstücke neue, vollständige Individuen zu erzielen und doch wird man dabei von einer wirklichen Fortpflanzung kaum sprechen wollen.

Es war schon vorher von dem freiwilligen Zerfall mancher Tiere die Rede, welcher die Ergänzung dieser Teilstücke zu einem vollständigen Tier ermöglicht und als Selbstzerstückelung oder Autotomie bezeichnet wird. Die Erscheinung ist nicht immer eine so weit gehende, daß sie einen erheblichen Teil des Körpers betrifft und derartig tief eingreifende Folgen hat, sondern sie kann sich auch an verhältnismäßig geringeren und weniger bedeutungsvollen Teilen des Körpers vollziehen. Schon früher wurde von gewissen Partien des Körpers gesprochen, welche sich verhältnismäßig leicht von ihm ablösen, um nachher neu gebildet zu werden (Selbstverstümmelung). Man findet derartiges bereits bei den Protozoen; von Seerosen lösen sich die Tentakel ab und werden neu gebildet; Hydroiden, Moostierchen und andere stockbildende Tiere können ihre Köpfchen abwerfen und neue dafür entstehen lassen; Ringelwürmer vermögen die Schwanzspitze, Cirren u. dgl. exponiertere Körperteile spontan abzutrennen, gleiches hörten wir bereits früher von dem Schwanz der Reptilien und den Gliedmaßen der Arthropoden Diese beiden letzteren Objekte interessieren deshalb ganz besonders, weil bei ihnen auf besondere Weise (Anordnung und Ausbildung der Skeletteile sowie Muskeln) Stellen geringerer Widerstandsfähigkeit, sogenannte Bruchgelenke, hergestellt sind, an denen nach Reizung die Loslösung des betreffenden Gliedes und später die Regeneration erfolgt. Es braucht kaum bemerkt zu werden, daß es ungemein nützlich für die betreffenden Tiere ist, über Einrichtungen zu verfügen, welche es ihnen gestatten, durch Verletzung oder sonstwie unbrauchbar gewordene Teile abzustoßen oder Körperanhänge, an welchem sie von einem Feind erfaßt wurden, fahren zulassen, um sie später wieder neu zu bilden.

Einrichtungen wie die zuletzt besprochenen lassen es außerordentlich naheliegend erscheinen, nicht nur sie selbst, sondern die Regenerationsvorgänge überhaupt als durch Anpassung entstanden anzusehen. Ueber diesen Punkt sind nun die neueren Forscher recht verschiedener Meinung. Einigen erscheint die Regenerationsfähigkeit als eine für die Organismen so unbedingt notwendige Eigenschaft, daß sie ohne diese Fähigkeit kaum erhalten bleiben konnten, wie man sie denn auch schon bei den einzelligen Organismen findet (Vöchting, Roux). Wie nützlich und geradezu unentbehrlich die Regenerationsfähigkeit den Organismen ist, dürfte sich aus den hier angestellten Betrachtungen ohne weiteres ergeben haben. Nun handelt es sich aber weiter darum, ob die Regeneration eine den Organismen ursprünglich zukommende Eigenschaft oder durch Anpassung entstanden ist. Die letztere Meinung wird in sehr entschiedener Weise von Weismann vertreten, indem nach ihm „die allgemeine Regenerationsfähigkeit sämtlicher Teile eine durch Selektion herbeigeführte Errungenschaft niederer und einfacher Tierformen ist, die im Lauf der Phylogenese und der steigenden Kompliziertheit des Baues zwar allmählich mehr und mehr von ihrer ursprünglichen Höhe herabsank, die aber auf jeder Stufe ihrer Rückbildung in bezug auf bestimmte, biologisch wichtige und zugleich häufigem Verlust ausgesetzte Teile durch speziell auf diese Teile gerichtete Selektionsprozesse wieder gesteigert werden konnte.“ Dieser Auffassung traten jedoch andere Autoren (Morgan, Przibram u. a.) entgegen. Dabei stützten sie sich besonders auf Versuche, welche mit solchen Körperteilen vorgenommen wurden, die sehr exponiert, daher leicht verletzbar und infolgedessen nach jener Annahme ganz besonders regenerationsfähig sein sollten. Bei diesen Versuchen, auf welche hier leider nicht näher eingegangen werden kann, stellte sich heraus, daß solche Körperteile (es wurde besonders mit Arthropodenextremitäten experimentiert), welche besser geschützt oder aus anderen Gründen Verletzungen weniger ausgesetzt sind, ebenfalls regenerationsfähig und nicht einmal in so viel geringerem Grade ersatzfähig sind als die besonders exponierten

Körperteile. Aus diesen und anderen, hier aus Raummangel leider nicht zu diskutierenden Gründen vermochten jene Autoren die Regeneration nicht als Anpassungserscheinung, sondern eben als eine den Organismen ursprünglich zukommende Eigenschaft anzusehen. Dieser Auffassung neigen sich im ganzen auch erfahrene Beobachter auf botanischem Gebiet (Vöchting, Goebel) zu, indem sie Sprosse und Wurzeln von solchen Pflanzenteilen gebildet werden sahen, welche unter gewöhnlichen Verhältnissen kaum davon Gebrauch machen dürften. Außerdem scheinen bei den Pflanzen nicht einmal diejenigen Teile, welche am leichtesten beschädigt werden, durch ein besonders weitgehendes Regenerationsvermögen ausgezeichnet zu sein.

Von Bedeutung für die allgemeine Auffassung der Regeneration und ebenfalls nicht gerade für ihre Geltung als Anpassungserscheinung sprechend ist die Tatsache, daß auch innere Organe der Tiere bis zu einem gewissen Grade regenerationsfähig sind. Richtig ist allerdings, daß das Regenerationsvermögen innerer Organe im allgemeinen ein recht geringes ist. Daß beim Verlust umfangreicher Körperpartien, wie wir ihn zumal bei niederstehenden Tieren wiederholt kennen lernten, mehr oder weniger beträchtliche Teile des Darmkanals, Nervensystems, Gefäßapparats, der Muskulatur usw. neu gebildet werden, wurde bereits früher besprochen. Zielbewußte, auf die Ersatzfähigkeit der inneren Organe gerichtete Versuche zeigten, daß auch bei Wirbeltieren nicht unbeträchtliche Teile des Darmkanals, Respirationstraktus, Genitalapparates, der Nieren, Leber, Schilddrüsen, Speichel- und Lymphdrüsen, sowie auch die Muskulatur, Gefäße und andere Organe ersetzt werden können. Inwieweit dies nach Art einer echten Regeneration von der Wundstelle oder in Form von Neubildungen und Wucherungen in anderen Regionen des betreffenden Organes geschieht, welche in morphologischer und physiologischer Hinsicht die verloren gegangenen Teile ersetzen, kann hier nicht untersucht werden. Es muß genügen, festzustellen, daß Regenerationsprozesse auch an inneren Organen vor sich gehen.

15. Faktoren der Regeneration. 15a) Einfluß des ganzen Organismus. Die Ursachen, welche die Regeneration bewirken und ihren Verlauf beeinflussen, sind sehr verschiedenartiger Natur; begreiflicherweise mußten sie im Vorhergehenden schon wiederholt besprochen werden. Regeneration sahen wir gewöhnlich nach Entfernung eines Körperteils zu dessen Ersatz eintreten. Der normale Zustand des Organismus wurde geändert, indem ein Verlust am Körper stattfand; der durch die Verletzung ausgelöste Reiz gab den Anstoß zum Beginn der Regeneration. So konnte die Wundfläche, nämlich die freie Endigung vorher nicht freier Teile und die dadurch bedingte Aufhebung des Widerstandes als der die Regeneration auslösende Faktor erscheinen. Daß Umfang, Richtung und Lage der Wundfläche am Körper, sowie die Beziehung zu seinen Organen und Geweben für den Vollzug der Regeneration sehr bedeutungsvoll und zum Teil maßgebend sind, ergab sich bereits aus den vorhergehenden Ausführungen und wurde außerdem durch verschiedene Beispiele erläutert. Nach Roux ist „die Art der abnormen Veränderung selber zugleich die zureichende determinierende Ursache der Besonderheit der zu ihrem Ausgleich nötigen regulatorischen Leistungen".

Als eine für die Regeneration ungemein kennzeichnende, aber ebenso schwer zu erklärende Erscheinung wurde schon früher die Tatsache bezeichnet, daß bei ihr die verloren gegangenen Teile von ganz andersartigen Körperteilen in ihrer früheren Form geliefert werden können. Zur Erklärung hierfür hat man den regenerierenden Zellen und Geweben ähnliche Potenzen wie bei der Embryonalentwickelung zugeschrieben, indem man ein „Reserve-Idioplasma" annahm (Roux) oder besondere „Ersatzdeterminanten" vorhanden sein ließ (Weismann). Inwieweit die inneren Faktoren der Regeneration unter dem Einfluß des ganzen Organismus stehen, wurde bei Besprechung der Neubildungs-, Wachstums-, Umlagerungs- und Umgestaltungsvorgänge, überhaupt der in Verbindung mit Regeneration am Körper stattfindenden Regulationen und Restitutionen bereits hervorgehoben. Bei diesen Form- und Dimensionsänderungen des Körpers spielen nicht nur Zellvermehrungen, sondern auch Druck- und Spannungszustände eine Rolle. Diese hängen zum Teil von Flüssigkeitsdruck und Zirkulationsströmungen, zum Teil von den mechanischen Bedingungen, unter denen sich die betreffenden Körperpartien befinden, sowie von manchen anderen Faktoren ab. Die Funktion der Körperteile, an welchen die Regeneration erfolgt, erweist sich also für ihren Verlauf und die mit ihr in Verbindung stehenden Regulationen als sehr bedeutungsvoll. Instruktive Beispiele hierfür liefert die Beeinflussung der Regeneration durch den Bewegungszustand, wie sie durch die Versuche von Barfurth, Child u. a. mehrfach erwiesen wurde; so zeigten die neuerdings durch Harms an Molchen und Froschlarven ausgeführten Versuche, daß die funktionelle Inanspruchnahme des Ruderschwanzes dessen Regeneration nicht nur stark beschleunigt,

sondern auch hinsichtlich der Orientierung, sowie gestaltlichen und strukturellen Ausbildung wesentlich beeinflußt (man vgl. zu diesen Ausführungen auch die Artikel „Entwickelungsmechanik der Tiere“ und „Funktionelle Anpassung“).

Auffallende und vorläufig schwer erklärbare Beeinflussungen der Regenerate durch den gesamten Körper, zumal im Hinblick auf dessen Polarität, lernten wir bereits früher kennen und werden noch auf andere zurückzukommen haben, bei denen sich die Körperbeschaffenheit für den Vollzug der Regeneration ebenfalls als sehr wichtig erweist. Wie der ganze Körper, so können auch einzelne seiner Teile die Regeneration beeinflussen; besonders hat man das Nervensystem nach dieser Richtung verantwortlich gemacht, obwohl es freilich zumeist recht schwierig ist, diese und andere Einflüsse mit Sicherheit nachzuweisen. Den schon früher erwähnten Ersatz des Krebsauges durch einen Fühler beim Fehlen des Augenganglions hat man auf solche Weise gedeutet. Bei Regenerations- und Transplantationsversuchen an Regenwürmern sah man dann, wenn auf geeignete Weise ein freies Bauchmarkende hergestellt wurde, an der betreffenden Stelle und anscheinend unter dem Einfluß des Nervensystems einen neuen Kopf hervorwachsen (Joest, Morgan). An Teilstücken von Planarien war der Verlauf der Regeneration ein schnellerer und vollständigerer, wenn die Gehirnganglien vorhanden waren, als wenn sie fehlten, in welchem letzteren Fall die Regeneration eine unvollständige sein oder den regenerierten Stücken die rechte Lebenskraft fehlen kann. Der Einfluß des Nervensystems auf die Wiederherstellung einzelner Körperpartien und Organe ist bei einer Reihe von Wirbellosen und Wirbeltieren (Würmer, Echinodermen, Arthropoden, Amphibien u. a.) experimentell festgestellt und an der Art der Ausbildung der betreffenden Teile beim Vorhandensein oder Fehlen des Nervensystems geprüft worden. Im allgemeinen ist aus den Versuchen zu entnehmen, daß die Regeneration durch das Nervensystem beeinflußt wird; ganz besonders gilt dies für die Periode der funktionellen Entwickelung, während die Regeneration in früheren Stadien der Entwickelung eine gewisse Unabhängigkeit vom Nervensystem zeigen kann. Leider ist es hier nicht möglich, auf die höchst sinnreichen Experimente von Loeb, Barfurth, Przibram, Wilson, Wolff, Braus, Harrison u. a., durch welche je nachdem eine Beeinflussung oder Nichtbeeinflussung der Regeneration festgestellt wurde, sowie auf die daraus gezogenen wichtigen Schlüsse näher einzugehen, sondern es kann in dieser Beziehung nur auf die in der Literaturübersicht erwähnten zusammenfassenden Werke oder speziellen Untersuchungen verwiesen werden.

15b) Einfluß des Entwickelungszustandes und Alters. Daß gewisser anderer für die Regeneration wichtiger Faktoren ebenfalls schon im Laufe der vorhergehenden Darstellung gedacht werden mußte, lag in der Natur der Sache, so z. B. des Entwickelungszustandes und Alters der Tiere. So wurde wiederholt betont, daß in Entwickelung begriffene oder junge Tiere ein besonders weitgehendes Regenerationsvermögen zu haben pflegen, während dieses mit zunehmendem Alter mehr zurücktritt. Viele Tiere, die im ausgebildeten Zustand eine recht geringe oder gar keine Regenerationsfähigkeit zeigen, wie viele Wirbeltiere, Insekten u. a., besitzen sie im Jugendzustand oder als Larven unter Umständen in recht weitgehendem Maße. Abgesehen davon, daß dies durch eigens darauf gerichtete Versuche an den verschiedensten Tieren erwiesen wurde, wissen wir von uns selbst, wie jugendliche Personen am Körper entstehende Defekte und Wunden leichter und besser zur Ausheilung bringen, als dies bei älteren der Fall ist.

15c) Einfluß des Fortpflanzungszustandes. Diese letzteren Betrachtungen führen von selbst hinüber zu einem anderen Faktor, welcher bei der Regeneration eine Rolle spielen kann, nämlich zum Fortpflanzungszustand der betreffenden Organismen. Bei Tieren mit sehr gut ausgebildetem Regenerationsvermögen kann dieses mit Eintritt der geschlechtlichen Fortpflanzung bedeutend zurücktreten. Von den Anneliden, an denen man dieses Verhalten beobachtete, ist es bekannt, daß die mit Regenerationsvorgängen eng in Verbindung stehende ungeschlechtliche Fortpflanzung die geschlechtliche zwar nicht gerade ausschließt, aber doch im allgemeinen dann statt hat, wenn die letztere nicht ausgeübt wird. Aehnlich verhalten sich andere Tiere wie Hydroidpolypen, Bryozoen und Tunicaten, obwohl damit nicht gesagt sein soll, daß ungeschlechtliche und Regenerationsvorgänge nicht auch gleichzeitig mit Teilungs- und Knospungserscheinungen auftreten könnten. Man kennt dies z. B. von unserem Süßwasserpolypen, bei dem man zu Zeiten knospende Individuen mit Eierstöcken sowie Hoden antrifft, wenn allerdings auch für gewöhnlich durch Knospung und gleichzeitig auf geschlechtlichem Wege sich fortpflanzende Individuen die Ausnahme bilden.

Ein bekanntes Beispiel für die Beeinflussung der Regeneration durch den Fortpflanzungszustand, welches freilich auf ein

anderes Gebiet hinüberführt, ist das Ausbleiben gewisser sekundärer Geschlechtscharaktere beim Verkümmern oder Entfernen der Keimdrüsen, vor allem die mangelhafte Ausbildung oder das gänzliche Fehlen des Geweihes bei kastrierten Hirschen und anderen Cerviden. Geschieht die Kastration vor dem Ausbilden der Stirnzapfen, so gelangt kein Geweih zur Entwickelung, erfolgt sie an Tieren mit ausgebildetem Geweih, so wird dieses abgeworfen. Bei gänzlicher oder teilweiser Rückbildung der Hoden kommen krüppelhafte Geweihe zur Entwickelung. Bezüglich dieser und anderer interessanter Erscheinungen, denen man in neuerer Zeit eine besondere Aufmerksamkeit gewidmet hat, sei auf die Artikel „Entwickelungsmechanik“ und „Geschlechtsbestimmung“ verwiesen.

15d) Einfluß des Ernährungszustandes. Der Ernährungszustand der Tiere scheint im ganzen einen recht geringen Einfluß auf ihr Regenerationsvermögen auszuüben, wie man sowohl an höheren wie an niederen Tieren feststellen konnte (Amphibien, Anneliden, Planarien, Polypen u. a.). Bei den Planarien, welche sich für derartige Versuche wegen ihrer großen, schon vorher erwähnten Lebenszähigkeit sehr gut eignen, geht zwar nach monatelangem Hungern und starkem Verringern des Körpervolumens die Regeneration langsamer als bei gut genährten Tieren vor sich, aber was den schließlichen Effekt anbetrifft, regenerieren sie dennoch wie diese. Sehr reichlich gefütterte Planarien regenerieren nicht einmal besonders gut, während andere, die einige Tage ohne Nahrung gelassen wurden, rascher als jene regenerierten. Die unter Umständen erstaunlich weitgehende Regenerationsfähigkeit solcher Teilstücke von Polypen, Planarien und Anneliden, die zur Nahrungsaufnahme nicht mehr befähigt sind, wurde schon früher besprochen (Fig. 28 u. 29).

15e) Einfluß der äußeren Faktoren. Bei den hier wie schon bei der früheren Darstellung mehrfach erwähnten Faktoren der Regeneration handelte es sich hauptsächlich um solche, welche durch die Organisation der betreffenden Tiere bedingt sind oder irgendwie mit ihr in Verbindung stehen, also um „innere Faktoren“ der Regeneration; außerdem kommen gewisse „äußere Faktoren“ in Betracht, die freilich von jenen nicht scharf zu trennen sind, wie sich ebenfalls aus der vorhergehenden Darstellung ergibt; es braucht nur an den Ernährungszustand, das Verbrauchtwerden infolge schädigender äußerer Einflüsse mit zunehmendem Alter, an gewisse mit der Umgebung im Zusammenhang stehende Erscheinungen des Fortpflanzungszustandes und anderes erinnert zu werden. Aeußere Faktoren, welche die Regeneration mehr oder weniger stark beeinflussen können, sind Temperatur, Licht oder Lichtmangel, Aenderungen in der Beschaffenheit des umgebenden Mediums, Schwerkraft, Kontaktwirkung usf.

Was die Beeinflussung der Regeneration durch die Temperatur anbelangt, so verhält sie sich ganz ähnlich wie Entwickelungsvorgänge im allgemeinen, für die ein gewisses Optimum, d. h. eine mittlere Temperatur besteht, bei der sie am raschesten und sichersten verlaufen, während sie nach einem Minimum und Maximum hin an Intensität abnehmen, bis die Entwickelungsmöglichkeit an diesen beiden extremen Punkten überhaupt aufhört. Man hat die günstigste Temperatur für den Verlauf der Regenerationen bei einigen Tierformen zu ermitteln gesucht; es braucht kaum erwähnt zu werden, daß sie sich nach den Lebensverhältnissen der betreffenden Tiere richtet und dementsprechend recht verschieden ist. Aehnliches gilt, wenn allerdings auch nicht in so auffallendem Maße für die Lichtwirkung. Bei niederen Tieren hat sich eine Verzögerung oder sogar Verhinderung der Regeneration durch den Lichtabschluß und ein Wiedereintreten in den Regenerationsprozeß nach erneuter Belichtung feststellen lassen. Die stärker brechbaren Lichtstrahlen des blauen Lichtes sollen die Regeneration im günstigen Sinne beeinflussen, während dies bei manchen Tieren nicht der Fall und ein Unterschied nicht vorhanden sein soll, wie überhaupt gewisse Tiere hinsichtlich der Regeneration vom Licht recht unabhängig zu sein und im Dunkel ebenso rasch wie im Hellen zu regenerieren scheinen. Dies wie die noch zu besprechenden und manche anderen Probleme der Regeneration bedürfen einer eingehenden experimentellen Prüfung. Dies gilt z. B. auch für den Einfluß, welchen das umgebende Medium auf die Regeneration haben kann; sie wird ganz besonders für wasserlebende Tiere in Betracht kommen und bei ihnen am besten zu prüfen sein. Bei solchen Versuchen, für welche sich wegen des leicht zu modifizierenden Salzgehaltes des Seewassers marine Tiere als besonders geeignet erweisen, zeigt sich, daß der Grad der Konzentration, sowie die Zusammensetzung des Wassers, d. h. das Vorhandensein oder Fehlen gewisser Stoffe, der Sauerstoffgehalt usf. für den Vollzug der Regeneration und die dabei beteiligten Wachstumsvorgänge von Bedeutung ist. Es kommen dabei sowohl chemische wie physikalische Einflüsse (osmotische, Druckwirkungen etc.) in Betracht. In letzterer Beziehung haben die im Hinblick auf die Kontakt- und Schwerkraftwirkung vorgenommenen Versuche interessante Resultate ergeben. Hier sind es haupt-

sächlich die von J. Loeb mit Hydroidpolypen angestellten und von anderen Autoren erfolgreich fortgeführten Experimente, welche diese Verhältnisse in klarer, überzeugender Weise erläutern. Die betreffenden Versuche wurden in ganz ähnlicher Weise ausgeführt, wie die schon früher besprochenen, durch welche eine Umkehrung der Polarität erzielt werden sollte; auch sind die Ergebnisse damit sehr übereinstimmende. Werden Stücke vom Stock der betreffenden Hydroiden frei im Wasser orientiert, dann aber am Scheitelpol mit einem festen Körper in Berührung gebracht, so gelangen an diesem apikalen Ende keine Köpfchen, sondern Wurzeln zur Ausbildung. Stammstücke, welche senkrecht mit dem Scheitelpol nach unten orientiert werden, bringen an diesem Wurzeln, an dem nach oben gekehrten basalen Pol hingegen Zweige mit Köpfchen hervor. Entsprechend verhalten sich schräg (mit dem basalen Pol nach oben) gerichtete Zweig- oder Stammstücke, nur daß bei ihnen wie bei horizontal gerichteten Zweigen auch noch von den nach unten gekehrten Zweigspitzen Wurzeln ausgehen, während oben neue Sprosse aufsteigen. Bei diesen und ähnlichen Versuchen sieht man also unter der Wirkung der Schwerkraft eine Umkehrung der Polarität eintreten, die so, wie es vorher eingehender dargestellt wurde, mit mehr oder weniger weitgehender Umarbeitung vorhandenen Materials, Verlagerung von Teilen, Wachstumsveränderungen usw. verbunden sein muß. Inwieweit dabei die Einwirkung der Schwerkraft etwa nach Art eines richtenden Einflusses auf die einzelnen Teilchen zu denken ist oder wie sie sonst wirkt, kann hier nicht erörtert werden. In dieser Beziehung, wie im Hinblick auf manche andere Fragen theoretischer Natur sei nochmals auf die Artikel „Entwickelungsmechanik und Entwickelungsphysiologie der Tiere und der Pflanzen" verwiesen.

Literatur. *Als zusammenfassende Werke seien besonders die von* **Aschoff, Barfurth, Driesch, Goebel, O. Hertwig, Korschelt, Marchand, Morgan, Przibram, Roux und Weismann** *genannt, in denen auch die weitere, hier nicht ausführlich mitgeteilte, sehr umfangreiche Literatur angegeben ist.* — **L. Aschoff**, *Regeneration und Hypertrophie. Ergebn. d. Allg. und Pathol. Morph. und Physiol. (Lubarsch und Ostertag), 1895.* — **D. Barfurth**, *Versuche zur funktionellen Anpassung. Archiv für mikr Anat., 37. Bd., 1891.* — **Derselbe**, *Regeneration und Involution. Ständige, sehr eingehende Berichte in Merkel-Bonnets Ergebnissen der Anatomie und Entwickelungsgeschichte, 1891 bis 1912.* — **Derselbe**, *Regeneration und Transplantation in der Medizin. Jena 1910.* — **Derselbe**, *Das Regenerationsvermögen der Kristalle und Organismen. Biophysikalisches Zentralblatt, 1. Bd., 1906.* — **Derselbe**, *Die Erscheinungen der Regeneration bei Wirbeltieren. O. Hertwigs Handbuch der Entwickelungsgeschichte 3. Bd., 1906.* — **J. Berninger**, *Ueber Einwirkung des Hungers auf Hydra. Zool. Anz., 36. Bd., 1910.* — **Derselbe**, *Reduktions- und Restitutionsvorgänge bei Süßwasserplanarien nach Hungerwirkung. Zool. Jahrb. (Physiol. Abt.), 30. Bd., 1911.* — **C. M. Child**, *Studies in Regulation (Cerianthus, Planaria u. a.). Biol. Bull., Vol. V bis VIII, 1903 bis 1905; Arch. f. Entwickelungsmech., 15., 19. und 20. Bd., 1902 bis 1905; Journ. Exp. Zool., Vol. I bis VII, 1904 bis 1909.* — **S. Colucci**, *Rigenerazione parziale dell'occhio nei Tritoni. Mem. Accad. Bologna (5), Vol. I, 1891.* — **R. Czwiklitzer**, *Zur Regeneration des Vorderendes von Ophryotrocha puerilis. Arch. f. Entwickelungsmech., 19. Bd., 1905.* — **Dawydoff**, *Regeneration von Kopfstücken bei Nemertinen. Zool. Anz., 36. Bd., 1910.* — **H. Driesch**, *Reparation und Regulation bei Tubularia. Vierteljahrsschrift d. Naturforsch. Ges. Zürich, 41. Bd., 1896; Arch. f. Entwickelungsmech. 5., 9. und 11. Bd., 1897, 1899 und 1901.* — **Derselbe**, *Resultate und Probleme der Entwickelungsphysiologie. Ergebn. d. Anat. u. Entwickelungsgesch., 8., 11., 14. und 17. Bd., 1898, 1902, 1904 und 1909.* — **Derselbe**, *Die organischen Regulationen. Leipzig 1901.* — **Derselbe**, *Regulation bei Clavellinen. Arch. f. Entwickelungsmech., 14. Bd., 1902.* — **Derselbe**, *Skizzen zur Restitutionslehre. Arch. f. Entwickelungsmech., 20. Bd., 1905.* — **Derselbe**, *Regenerierende Regenerate. Arch. f. Entwickelungsmech., 21. Bd., 1906.* — **W. Figdor**, *Regeneration der Blattspreite bei Scolopendrium. Ber. d. Deutsch. Botan. Ges., 24. Bd., 1906.* — **Derselbe**, *Restitutionserscheinungen an den Blättern von Gesneriaceen. Jahrb. f. wiss. Botanik, 44. Bd., 1907.* — **A. Fischel**, *Ueber die Regeneration der Linse. Anatom. Hefte, XV, 1900 und Arch. f. Entwickelungsmech., 15. Bd., 1902.* — **C. Fritsch**, *Experimentelle Studien über Regeneration des Gliedmaßenskeletts bei den Amphibien. Zool. Jahrb., Abt. Phys., 30. Bd., 1911.* — **K. Goebel**, *Regeneration im Pflanzenreich. Biol. Centralbl., 22. Bd., 1902.* — **Derselbe**, *Studien über Regeneration. Flora, 92. und 93. Bd., 1903 und 1904.* — **Derselbe**, *Allg. Regenerationsprobleme. Flora, 1905.* — **Derselbe**, *Einleitung in die experimentelle Morphologie der Pflanzen. Leipzig und Berlin 1908.* — **E. Godlewski**, *Regulationsvorgänge bei Tubularia. Arch. f. Entwickelungsmech., 18. Bd., 1904.* — **A. Gruber**, *Künstliche Teilung bei Infusorien. Mikroskopische Vivisecktion. Biol. Centralbl., 4. Bd., 1884 und Ber. d. Naturforsch. Ges. Freiburg, 1. und 7. Bd., 1886 und 1893.* — **W. Harms**, *Ueber funktionelle Anpassung bei Regenerationsvorgängen. Arch. f. d. ges. Physiol., 132. Bd., 1910.* — **B. Hofer**, *Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß des Kerns auf das Protoplasma. Jen. Zeitschr. f. Naturw., 24. Bd., 1890.* — **G. Klebs**, *Beiträge zur Physiologie der Pflanzenzelle, II. Tübingen 1888.* — **Derselbe**, *Entwickelungsänderungen bei Pflanzen. Jena 1903.* — **Derselbe**, *Künstliche Metamorphosen. Abhandl. d. Naturforsch. Ges. Halle, 25. Bd., 1906.* — **W. Koelitz**, *Morphologische und experimentelle Untersuchungen an Hydra. Arch. f. Entwickelungsmech., 31. Bd., 1911.* — **E. Korschelt**, *Regenerationsvermögen der Regenwürmer. Sitzungs-*

ber. d. Naturforsch. Ges. Marburg, 1897 und Verhandl. d. Deutsch. Zool. Ges., 1898. — **Derselbe,** Regeneration und Transplantation. Jena 1907. — **Derselbe,** Beeinflussung der Komponenten bei Transplantation. Medizin. Naturwiss. Archiv., 1. Bd., 1908. — **E. Küster,** Pathologische Pflanzenanatomie. Jena 1903. — **O. Lehmann,** Ueber das Zusammenheilen und Ausheilen fließend-weicher Kristalle. Zeitschr. f. physikal. Chemie, 18. Bd., 1895. — **Derselbe,** Flüssige Kristalle. Leipzig 1904. — **Derselbe,** Fließende Kristalle und Organismen. Arch. f. Entwickelungsmech., 21. Bd., 1906. — **Derselbe,** Scheinbar lebende Kristalle usw., ebenda, 26. Bd., 1908 und Biolog. Centralbl., 28. Bd., 1908. — **H. Leypoldt,** Transplantationsversuche an Lumbriciden. Arch. f. Entwickelungsmech., 31. Bd., 1910. — **F. Lillie,** On the smallest parts of Stentor capable of regeneration. Journ. Morph., Vol. 12, 1896. — **J. Loeb,** Untersuchungen zur physiologischen Morphologie der Tiere. Würzburg 1891 und 1892. — **Derselbe,** On some facts and principles of physiological Morphology. Biol. Lect. Woods Hall 1893/94. — **Derselbe,** Ueber den Einfluß des Lichts auf die Organbildung bei Tieren. Arch. f. d. ges. Physiol., 63. Bd., 1896. — **Derselbe,** Zur Theorie der physiol. Licht- und Schwerkraftwirkung, ebenda, 66. Bd., 1897. — **F. Marchand,** Die Prozesse der Wundheilung. Deutsche Chirurgie. Leipzig 1901. — **H. Miehe,** Wachstum, Regeneration und Polarität isolierter Zellen. Ber. d. Botan. Ges., 23. Bd., 1905. — **Th. Morgan,** Regeneration. New York 1901 (übersetzt von M. Moszkowski, Leipzig 1907) und viele andere dort und bei **Korschelt** (1907) angeführte Schriften über Regeneration. — **C. Müller,** Regenerationsversuche an Lumbriculus. Arch. f. Entwickelungsmech., 26. Bd., 1908. — **E. Müller,** Regeneration der Augenlinse nach Exstirpation bei Tritonen. Arch. mikr. Anat., 47. Bd., 1896. — **K. Müller,** Das Regenerationsvermögen der Süßwasserschwämme usw. Arch. f. Entwickelungsmech., 32. Bd., 1911. — **B. Němec,** Studien über Regeneration. Berlin 1905. — **J. Nusbaum und M. Oxner,** Studien über die Regeneration bei Nemertinen. Arch. f. Entwickelungsmech., 30. Bd., 1910 und Zool. Anzeiger, 37. Bd., 1911. — **Dieselben,** Studien über die Wirkung des Hungerns bei den Nemertinen, ebenda, 34. Bd., 1912. — **F. Peebles,** Experimental studies on Hydra. Arch. f. Entwickelungsmech., 5. Bd., 1897. — **H. Przibram,** Experimentelle Studien über Regeneration. Arch. f. Entwickelungsmech., 11. und 13. Bd., 1901/02. — **Derselbe,** Formregulationen verletzter Kristalle. Zeitschr. f. Kristallographie und Mineralogie, 39. Bd., 1904. — **Derselbe,** Einleitung in die exper. Morphologie der Tiere. Leipzig und Wien 1904. — **Derselbe,** Experimental-Zoologie (Regeneration). Leipzig und Wien 1907. — **Derselbe,** Kristallanalogien zur Entwickelungsmechanik der Organismen. Arch. f. Entwickelungsmech., 23. Bd., 1907. — **H. W. Rand,** Regeneration and Regulation in Hydra. Arch. f. Entwickelungsmech., 8. Bd., 1899. — **A. Rauber,** Die Regeneration der Kristalle. Leipzig 1895. — **Derselbe,** Atlas der Kristallregeneration. Leipzig 1901. — **Derselbe,** Ontogenese als Regeneration betrachtet, I und II. Leipzig 1908 und 1909. — **L. Rhumbler,** Aus dem Lückengebiet zwischen organischer und anorganischer Materie. Ergebn. d. Anat. und Entwickelungsgesch., 15. Bd., 1905 (1906). — **K. Ribbert,** Ueber Neubildung von Talgdrüsen. Arch. f. Entwickelungsmech., 18. Bd., 1904. — **W. Roux,** Der Kampf der Teile im Organismus. Leipzig 1881. — **Derselbe,** Gesammelte Abhandlungen. Leipzig 1895. — **Derselbe,** Regulation und Entwickelung usw., in: Vorträge und Aufsätze über Entwickelungsmechanik. Leipzig 1905. — **C. Ruttloff,** Transplantationsversuche an Lumbriciden. Arch. f. Entwickelungsmech., 25. Bd., 1908. — **E. Schultz,** Reduktionen, Hungererscheinungen bei Planarien. Arch. f. Entwickelungsmech., 18. Bd., 1904. — **Derselbe,** Hungererscheinungen bei Hydra, ebenda, 21. Bd., 1906. — **Derselbe,** Umkehr der Entwickelungsprozesse. Leipzig 1908. — **G. Tornier,** Hyperdactylie, Regeneration usw. Arch. f. Entwickelungsmech., 3. und 4. Bd., 1896; Zool. Anz., 24. Bd., 1900; Morphol. Jahrb., 31. Bd., 1903. — **Derselbe,** Der Kampf der Gewebe im Regenerat. Arch. f. Entwickelungsmech., 22. Bd., 1906. — **C. O. Townsend,** Ueber den Einfluß des Zellkerns auf die Bildung der Zellhaut. Jahrb. f. wiss. Botanik, 30. Bd., 1897. — **H. Vöchting,** Ueber Transplantation im Pflanzenkörper. Tübingen 1892. — **Derselbe,** Ueber die Bildung der Knollen. Zur Physiologie der Knollengewächse. Bibl. botanica, 4. Bd., 1887 und Jahrb. f. wiss. Bot., 34. Bd., 1900. — **Derselbe,** Ueber die Regeneration der Araucaria excelsa. Jahrb. f. wiss. Botanik, 40. Bd., 1904. — **Derselbe,** Untersuchungen zur experimentellen Anatomie und Pathologie des Pflanzenkörpers. Tübingen 1908. — **A. Weismann,** Das Keimplasma. Jena 1892. — **Derselbe,** Tatsachen und Auslegungen in Bezug auf Regeneration. Anat. Anz., 15. Bd., 1899. — **Derselbe,** Vorträge über Deszendenztheorie. Jena 1902. — **H. Winkler,** Nachträgliche Umwandlung von Blütenblättern und Narben in Laubblätter. Ber. d. Deutsch. Bot. Ges., 20. Bd., 1902. — **Derselbe,** Regeneration der Blattspreite bei Cyclamen. Ber. d. Deutsch. Botan. Ges., 20. Bd., 1902. — **Derselbe,** Regenerative Sproßbildung an den Blättern von Torenia und Ranken von Passiflora. Ber. d. Deutsch. Botan. Ges., 21. und 23. Bd., 1903 und 1905. — **H. V. Wilson,** On some phenomena of coalescence and regeneration in Sponges. Journ. Exp. Zool., Vol. 5, 1907. — **Derselbe,** On the behaviour of the dissociated cells in Hydroids, Alcyonaria and Asterias, ebenda, Vol. 11, 1911. — **G. Wolff,** Regeneration der Urodelenlinse. Arch. f. Entwickelungsmech., 1. und 12. Bd., 1895 und 1901.

E. Korschelt.

Regentropfen,
fossile Regentropfen.

Kleine kraterartige bis etwa einen Zentimeter breite Vertiefungen in tonigen und sandigen Gesteinen verschiedener Formationen, von denen anzunehmen ist, daß sie die im Schlamm hervorgebrachten Eindrücke vorweltlicher Regentropfen darstellen.

Regionalmetamorphose

= Allgemeine Metamorphose. Bedeutet die allgemein verbreiteten Veränderungen der archäischen Gesteine (vgl. die Artikel „Archäikum" und „Mineral- und Gesteinsbildung durch Metamorphose").

Regnault

Henri Victor.

Geboren am 21. Juli 1810 in Aachen, gestorben am 19. Januar 1878 in Auteuil bei Paris. Er studierte 1830 bis 1832 an der polytechnischen Schule in Paris, wurde dann Schüler im Corps des Mines, 1847 Ingénieur-en-chef und gleichzeitig Professor der Physik an der polytechnischen Schule und am Collège de France, 1854 Direktor der Porzellanfabrik zu Sèvres. Bei Ausbruch des Krieges 1870 legte er seine Aemter nieder und verließ seine Heimat; bei seiner Rückkehr nach dem Friedensschluß fand er seine Papiere und Instrumente zerstört. Regnaults sehr ausgedehnte und exakte Untersuchungen beschäftigen sich vorwiegend mit der Dichtigkeit und Kompressibilität der Gase, der Verdampfungswärme des Wassers und anderer Flüssigkeiten, der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles.

Literatur. *Dumas, Éloge historique de H. V. Regnault, Paris 1881.*

E. Drude.

Reibung.

1. Einleitung. Reibung im allgemeinen, Energieverlust, Korrektur an den Gesetzen der Mechanik. Unter Reibung versteht man in erster Linie die Widerstandskräfte, die bei der Bewegung fester Körper aufeinander auftreten. In Figur 1 sind zwei Körper gezeichnet, die miteinander in Berührung stehen. Für ihre gegenseitige Einwirkung kommen zwei Kräfte und zwei Drehmomente in Frage:

a) die Normalkraft N senkrecht zur gemeinsamen Berührungsebene.

b) die in der Berührungsebene liegende und parallel zur momentanen Bewegung gerichtete Kraft der gleitenden Reibung R,

c) das Moment M der rollenden Reibung, dessen Achse in der Berührungsebene liegt,

d) das Moment L der drehenden oder bohrenden Reibung, dessen Achse mit der Normalen N zusammenfällt.

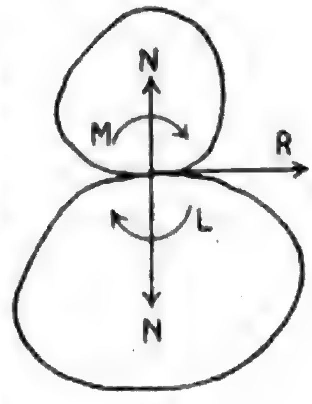


Fig. 1.

Die Bezeichnung „Reibung" erteilt man auch noch denjenigen Erscheinungen, die auftreten, wenn feste Körper sich in Flüssigkeiten oder gasförmigen Medien bewegen, ebenso ordnet man die Arbeitsverluste, die bei der Bewegung von Flüssigkeiten oder Gasen an sich entstehen, ebenfalls unter die Reibungsverluste ein. Das Gemeinsame aller dieser Erscheinungen ist der Energieverlust, der bei den verschiedenen Bewegungen von Körpern relativ zueinander auftritt. Die Reibungserscheinungen bedingen Korrekturen an den abstrakten Gesetzen der Mechanik, wobei oftmals diese Korrekturen so erheblich ausfallen, daß das ohne Rücksicht auf die Reibung abgeleitete Erscheinungsgesetz seinen Charakter unter Berücksichtigung der Reibung vollständig verändert.

Ein Beispiel hierfür bietet die Bewegung eines Geschosses in der Luft. Die übliche Erörterung der Bewegung eines festen Körpers in einem luftleeren Raum unter Einfluß der Schwere liefert bekanntlich das Ergebnis, daß das Maximum der Wurfweite erzielt wird, wenn der Körper in einem Neigungswinkel von 45° gegen die Horizontale geworfen wird. Schon Euler war bekannt, daß dies keineswegs zutreffend ist. In der Vorrede zu seiner Uebersetzung von Robins „Neue Grundsätze der Artillerie (1745)" sagt er, daß dieser Winkel kleiner als 45° ist. Was nun die Wurfweite selbst anlangt, so würde die Rechnung ohne Reibung bei einer Anfangsgeschwindigkeit von etwa 620 m in der Sekunde einen Betrag von 40 km ergeben. Dagegen ergibt die deutsche Schießvorschrift für die Infanterie als tatsächliche Schußweite, die sich bei jener dem Infanteriegewehrmodell 88 entsprechenden Anfangsgeschwindigkeit findet, nur einen Betrag von 4 km, und zwar bei einem Elevationswinkel von 32°. Die Figur 2 zeigt, wie sehr die ohne Berücksichtigung der Reibung berechnete und die wirkliche Schußbahn voneinander abweichen.

2. Geschichtliche Entwickelung der Untersuchung der Reibungsvorgänge. Entstehung der wichtigsten Begriffe. Die früheste Untersuchung der Reibungsvorgänge ging von technischen Gesichtspunkten aus, wobei es in der Natur der Sache lag, daß die ältesten Experimentatoren zunächst den

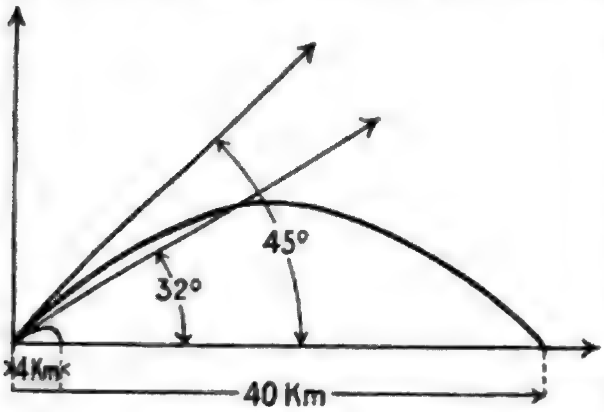


Fig. 2.

Zusammenhang zwischen der Normalkraft N und der gleitenden Reibung R (s. Fig. 1) zu ergründen suchten.

Der erste, der es unternahm, den Widerstand zu messen, den ein schwererer Körper einer Verschiebung auf seiner Unterlage entgegensetzt, war vermutlich Leonardo da Vinci (1452 bis 1519). Seine Versuche, die bereits zwischen der Reibung trockener und geschmierter Flächen unterschieden und zu einer ersten Formulierung des Begriffes des Reibungskoeffizienten führten, wurden 100 Jahre später von Amontons (1663 bis 1705) wieder aufgenommen. Amontons stellte das später nach Coulomb benannte Gesetz der Proportionalität des gleitenden Reibungswiderstandes mit der Normalkraft unabhängig von der Größe der Berührungsflächen auf, und kannte schon den Unterschied zwischen Reibung der Ruhe und Reibung der Bewegung.

Gleichzeitig mit Amontons beschäftigte sich Parent (1666 bis 1716) mathe-

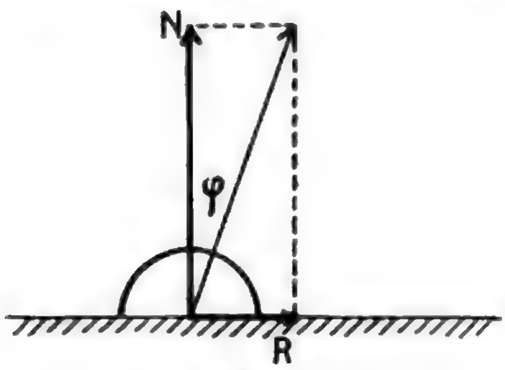


Fig. 3.

matisch mit den Reibungserscheinungen; ihm verdankt man die Formulierung des Begriffes des Reibungswinkels φ (Fig. 3) und den Satz, daß seine Tangente dem Reibungskoeffizienten gleich ist. Waren so die wesentlichen Grundlagen der Reibungserscheinungen bereits im Anfang des 18. Jahrhunderts festgestellt, so wurden doch die experimentellen Erscheinungen erst gegen Ende des Jahrhunderts von Coulomb um einen beträchtlichen Schritt vorwärts gebracht. Seit 1781 ist das Coulombsche Gesetz

$$R = \mu . N$$

allgemein in der wissenschaftlichen Technik gebräuchlich; ebenso blieben die durch Coulombs Versuche festgestellten Reibungszahlen ein halbes Jahrhundert lang die Grundlage für alle maschinellen Konstruktionsberechnungen. Was weiter im 19. Jahrhundert zur Erforschung der Reibungsvorgänge getan wurde, findet man in Rühlmanns Vorträgen zur Geschichte der technischen Mechanik ausführlich geschildert.

Gleichzeitig mit der Untersuchung der gleitenden Reibung wurde auch die der rollenden Reibung in Angriff genommen. Es ist dies der Widerstand, der auftritt, wenn zwei Körper sich so bewegen, daß ihre Oberflächen sich aufeinander abwickeln. Dieser Reibungswiderstand rührt daher, daß die sich bewegenden Körper nicht formfest sind, sondern daß der eine in den anderen unter dem Einfluß des Normaldruckes N einsinkt, und beim Weiterwälzen die dieser Bewegung sich entgegenstellenden Partien des anderen Körpers niederdrücken muß. Da der Widerstand der rollenden Reibung sich als Moment äußert, so hat der Koeffizient f der rollenden Reibung die Dimensionen einer Strecke und es wird das Moment der rollenden Reibung (s. Fig. 4)

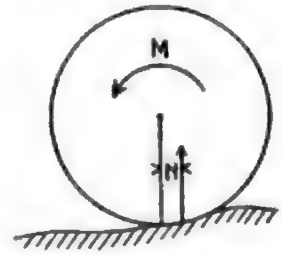


Fig. 4.

$$M = f . N$$

Aus Vorstehendem ergibt sich, daß die rollende Reibung bei glatten und harten Oberflächen viel kleiner sein muß als bei rauhen und weichen. Die rollende Reibung spielt eine wichtige Rolle bei der Berechnung des Widerstandes von Fahrzeugen, besonders von Eisenbahnzügen.

Technischen Zwecken diente ferner die Ermittelung der Gesetze der Seilreibung, die man besonders Euler verdankt. Es handelt sich hier um das Gleichgewicht eines um einen Zylinder geschlungenen Fadens unter Einfluß der an seinen freien Enden wirkenden Spannungen und der Reibung zwischen ihm und dem Zylinder. Betrachten wir in Figur 5 einen Faden, der um den feststehenden

Zylinder herumgelegt, einen Bogen α umschließt, so besteht zwischen den in den freien Enden wirkenden Spannungen S_0 und S_1 die Beziehung:

$$S_1 = S_0 . e^{u\alpha}$$

d. h. man kann einer verhältnismäßig großen Kraft S_1 durch eine kleine Kraft S_0 das Gleichgewicht halten, da die Exponential-

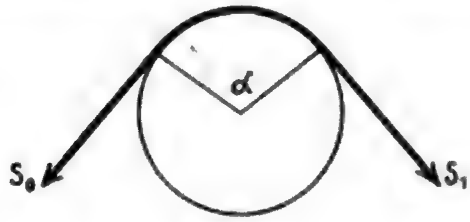


Fig. 5.

funktion mit wachsendem Umspannungsbogen sehr schnell wächst. Von dieser Gleichung macht man auch bei der Berechnung von Riementrieben Gebrauch, worüber Näheres im Artikel „Maschinen" nachzulesen ist.

Bei der Erörterung von Reibungsfragen verdient auch die Seilsteifigkeit Erwähnung. Man versteht hierunter ein Bewegungshemmnis, welches sich aus dem Widerstande ergibt, den ein Seil dem Uebergang aus der geradlinigen in die gekrümmte Form und umgekehrt entgegensetzt (Fig. 6). Man berücksichtigt dieses Bewegungshemmnis, welches in erster Linie bei Riemen und Seiltrieben auftritt, indem man die Kräfte, die die Bewegung hervorrufen, um einen dem Seilsteifigkeitskoeffizienten ζ proportionalen Betrag vermindert. Näheres hierüber s. den Artikel „Maschinen".

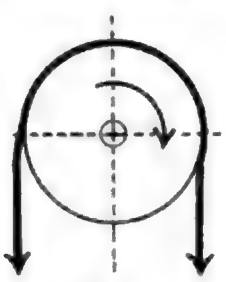


Fig. 6.

3. Reibung fester Körper ohne Schmiermittel. Die Erkenntnis, daß die gleitende Reibung zwischen ungeschmierten Körpern wesentlich von der Rauhigkeit der Oberflächen abhängt, geht, wie schon erwähnt, auf Leonardo da Vinci zurück. Es hat dann auch später nicht an Versuchen gefehlt, mit Hilfe von mathematischen Formulierungen und Voraussetzungen über die geometrische Gestalt der Rauhigkeiten eine theoretische Berechnung des Koeffizienten der trockenen Reibung zu gewinnen. Die entsprechenden Resultate waren aber nicht mit den Versuchen in Einklang zu bringen. Um nun den Entstehungsursachen der Reibung zwischen trockenen Flächen auf den Grund zugehen, haben Warburg und v. Babo 1877 Versuche mit Körpern gemacht, deren Oberflächenbeschaffenheit möglichst gut definiert war und kontrolliert werden konnte. Sie benutzten für ihre Reibungsversuche gut polierte optische Gläser und fanden in der Tat, daß die Reibung zwischen trockenen Flächen eine von der Geschwindigkeit unabhängige Kraft ist und dem Coulombschen Gesetz der Proportionalität zwischen Reibung und Belastung genügt. Berücksichtigt man, daß dieses Gesetz nur für ein verhältnismäßig kleines Gebiet gilt, so wird durch die Versuche von Warburg und v. Babo wahrscheinlich gemacht, daß der Coulombsche Ansatz genau nur für die trockene Reibung gilt, während für die Reibung zwischen geschmierten Flächen eine andere Beziehung aufzustellen ist.

4. Poiseuilles Theorie der Reibung von Flüssigkeiten. Die Beobachtung der Flüssigkeitsströmungen in Röhren gibt Anlaß, den Begriff der inneren Reibung oder der Zähigkeit festzulegen. Die innere Reibung tritt in Erscheinung, wenn zwischen zwei etwa parallel laufenden Stromlinien eine Relativbewegung stattfindet. Betrachtet man die Strömung in einem Rohre von Radius r (Fig. 7), bei der sämtliche Strom-

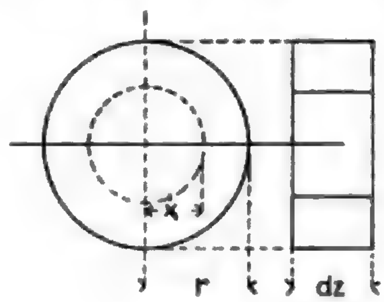


Fig. 7.

linien geradlinig und parallel zur Stromachse sind, so ergibt schon eine einfache Ueberlegung, daß unter dem Einfluß der inneren Reibung oder Zähigkeit die Strömungsgeschwindigkeit an der inneren Rohrwand kleiner sein wird als in der Mitte. Bezeichnen wir das Geschwindigkeitsgefälle von der Mitte zum Rand in der Richtung des Radius mit

$$\frac{dv}{dx},$$

so wird auf den Flüssigkeitszylinder vom Radius x an seinem Umfang eine verzögernde Kraft einwirken pro Längeneinheit

$$= 2\pi x . k . \frac{dv}{dx}$$

oder bezogen auf die Zylinderlänge dz

$$= 2\pi x . k . dz . \frac{dv}{dx}.$$

Dieser verzögernden Kraft muß im Beharrungszustande die Druckdifferenz an den beiden Enden des Zylinders von der Länge dz das Gleichgewicht halten. Da nun die Druckabnahme pro Längeneinheit eine Konstante c sein muß, so ergibt sich als Gleichgewichtsgleichung der Kräfte am betrachteten Zylinder:

$$c.\pi x^2.dz = 2\pi.xk.dz.\frac{dv}{dx},$$

woraus sich durch Integration ergibt:

$$v = C - c.\frac{x^2}{4x}.$$

Führt man hier die Bedingung ein, daß für $x = r$, $v = o$ genommen werden muß, so ergibt sich als Gleichung der Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt

$$v = \frac{c}{4k}(r^2 - x^2).$$

Führt man nun noch die mittlere Geschwindigkeit ein, so ergibt sich für das Druckgefälle c die Beziehung

$$c = \frac{8kv_m}{r^2}.$$

Diese Formel ist für enge Rohre durch die Poiseuilleschen Versuche als richtig nachgewiesen worden. Bei größeren Rohrdurchmessern ist jedoch das Druckgefälle nicht mehr der ersten Potenz der mittleren Strömungsgeschwindigkeit proportional, sondern nahezu der zweiten Potenz. Vor allem O. Reynolds verdankt man die Erkenntnis, daß dies in der Verschiedenheit der Bewegungszustände begründet ist. Nach ihm gibt es für jeden Rohrdurchmesser eine kritische mittlere Strömungsgeschwindigkeit

$$V = \frac{k.K}{\mu.d},$$

wo k den Koeffizienten der inneren Reibung, μ die spezifische Masse der Flüssigkeit, d den Rohrdurchmesser, K eine absolute Konstante bedeutet, die zwischen 1900 und 2000 liegt. Strömungsbewegungen in dem Rohre, deren mittlere Strömungsgeschwindigkeit unterhalb von V liegt, gehen in der Weise vor sich, die wir oben bei der Ableitung der Poiseuilleschen Formeln voraussetzten: es sind Parallelströmungs- oder Laminarbewegungen. Oberhalb von V ist die Laminarbewegung nicht mehr stabil, es tritt eine „turbulente" Bewegung ein und das Druckgefälle ist einer höheren Potenz von V proportional.

5. **Reibung und Hydrodynamik.** Die oben eingeführten Vorstellungen über die Wirkung der inneren Reibung oder Zähigkeit einer Flüssigkeit führen auch zur Ableitung der allgemeinen Bewegungsgleichungen der zähen Flüssigkeiten. Man geht aus von den Gleichgewichtsgleichungen der Elastizität

$$\frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} + \frac{\partial X_z}{\partial z} + X = o$$
$$\frac{\partial Y_x}{\partial x} + \frac{\partial Y_y}{\partial y} + \frac{\partial Y_z}{\partial z} + Y = o$$
$$\frac{\partial Z_x}{\partial x} + \frac{\partial Z_y}{\partial y} + \frac{\partial Z_z}{\partial z} + Z = o$$

(vgl. den Artikel „Elastizität") führt für X Y Z die Komponenten der Trägheitskraft ein und formt die Schubspannungen in Ausdrücke um, die die von der Zähigkeit herrührenden, an dem Flüssigkeitselement angreifenden Kräfte enthalten, während die Normalspannungen von der Zähigkeit und dem Flüssigkeitsdruck p herrühren. So resultieren dann die Gleichungen:

$$\mu\left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1\frac{\partial v_1}{\partial x} + v_2\frac{\partial v_1}{\partial y} + v_3\frac{\partial v_1}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + k\Delta v_1$$
$$\mu\left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1\frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2\frac{\partial v_2}{\partial y} + v_3\frac{\partial v_2}{\partial z}\right) = -\frac{vp}{vy} + k\Delta v_2$$
$$\mu\left(\frac{\partial v_3}{\partial t} + v_3\frac{\partial v_3}{\partial x} + v_3\frac{\partial v_3}{\partial y} + v_3\frac{\partial v_3}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + k\Delta v_3$$

Hier bedeuten v_1 v_2 v_3 die Geschwindigkeitskomponenten am Orte x y z, μ die Maße der Raumeinheit, Δ den Laplaceschen Operator.

Zum Vergleiche seien die Eulerschen Gleichungen für eine ideale Flüssigkeit angeschrieben

$$\mu\left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{dx}$$
$$\mu\left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2\frac{\partial v_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial v_2}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y}$$
$$\mu\left(\frac{\partial y_3}{\partial t} + v_3\frac{\partial v_3}{\partial x} + \frac{\partial v_3}{\partial y} + \frac{\partial v_3}{\partial z}\right) = -\frac{dp}{\partial z}$$

Bei beiden Gleichungssystemen gilt als vierte Gleichung noch die Kontinuitätsbedingung

$$\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} + \frac{\partial v_3}{\partial z} = o$$

Die Integration der Gleichungssysteme ist in bestimmten speziellen Fällen möglich, so z. B. im Falle der Bewegung einer Kugel in der Flüssigkeit. Die Berechnung der Bewegung anders gestalteter Körper in einer Flüssigkeit bietet große Schwierigkeiten. Von praktischer Wichtigkeit ist die Bestimmung des Schiffswiderstandes. Diese erfolgt auf Grund der Froudeschen Modellregeln durch Modellversuche. Bei diesen Versuchen wird ein dem zu bauenden Schiff geometrisch ähnliches Modell mit einer noch anzugebenden Geschwindigkeit auf einer Wasserfläche geschleppt, wobei die Schleppkraft, d. h. der Modellwiderstand, gemessen wird. Man faßt den Schiffswiderstand R als aus zwei Teilen R_f und R_w sich zusammensetzend auf:

$$R = R_f + R_w$$

wo der Reibungswiderstand R_f durch die empirische Formel

$$R_f = kFv^{1,825}$$

bestimmt ist. Hier bedeutet k einen von der Gestalt des Schiffes abhängigen Formkoeffizienten, F die eingetauchte Schiffsfläche, v die Schiffsgeschwindigkeit. R_w ist der von der Reibung am Schiffskörper unabhängige Teil des Widerstandes.

Für das Modell gilt analog:

$$r = r_f + r_w.$$

Durch Schleppversuch mit dem Modell wird r gemessen, wobei die Modellgeschwindigkeit $v' = v\sqrt{\frac{1}{\lambda}}$ gewählt wird (λ die Linearverkleinerung des Modelles). r_f wird berechnet $= kf\,(v')^{1,825}$, womit sich ergibt:

$$r_w = r - r_f.$$

Jetzt findet man

$$R_w = \lambda^3 r_w$$

und den Gesamtwiderstand

$$R = kFv^{1,825} + \lambda^3 (r - r_f).$$

Coulombsche Formel war nur bei kleinen Geschwindigkeiten richtig. Wie die tatsächlichen Werte des Reibungskoeffizienten μ sich bei verschiedenen Umfangsgeschwindigkeiten und speziell Lagerpressungen gestalten, zeigt das Diagramm Figur 8.

Den Bemühungen von Petroff und Sommerfeld verdankt man die Erkenntnis, daß die Lagerreibung ganz wesentlich von den Gesetzen der Bewegung zäher Flüssigkeiten, deren Grundlage oben mitgeteilt ist, beherrscht wird. Sommerfeld insbesondere hat nachgewiesen, daß man bei Annahme einer Schmierflüssigkeit mit einem Zähigkeitskoeffizienten k, der unabhängig vom Druck ist, unter Zugrundelegung des Poiseuilleschen Ansatzes für die Flüssigkeitsreibung für das Reibungsmoment an einem Zapfen theoretische Werte findet, deren Abhängigkeit von Zapfenumfangsgeschwindigkeit und der spezifischen Lagerbelastung dem allgemeinen Charakter nach mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt, wobei allerdings bemerkt werden muß, daß es noch nicht möglich ist, für ein gegebenes

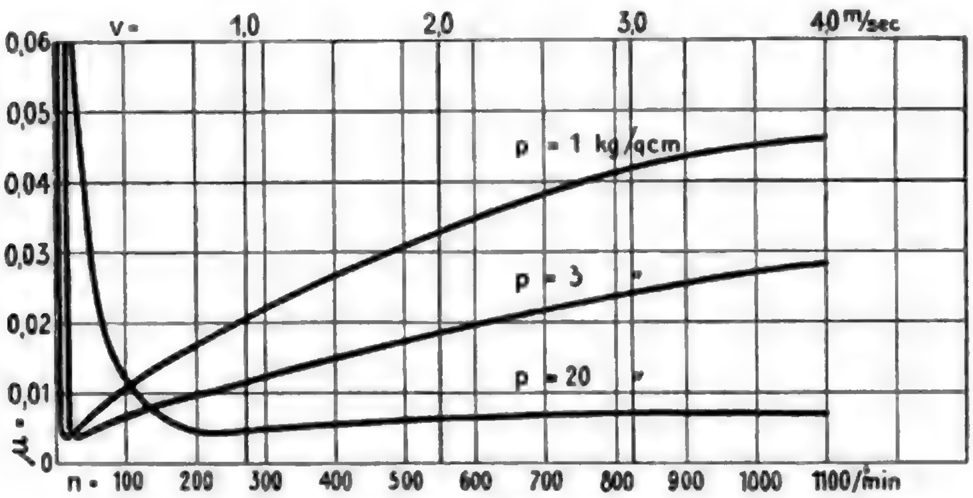


Fig. 8.

6. Sommerfelds hydrodynamische Theorie der Lagerreibung. Bis in die neuere Zeit ist in der Technik die Berechnung der Zapfen- und Lagerreibung von dem Coulombschen Ansatz ausgegangen. Bezeichnet P in kg den auf den Zapfen ausgeübten Druck, r den Zapfenradius in cm, und μ die Zapfenreibungszahl, so war

$$M = \mu . P . r$$

in cmkg das Moment der Zapfenreibung. Bei Versuchen, die in der neuesten Zeit angestellt wurden, stellte sich heraus, daß dieser Ansatz mit erheblichen Fehlern behaftet ist. Insbesondere trägt er nicht der Tatsache Rechnung, daß das Reibungsmoment bei raschlaufenden Maschinen der Zapfenumfangsgeschwindigkeit proportional ist; die Lager und eine Schmierflüssigkeit mit bekanntem Zähigkeitskoeffizienten das Moment der Lagerreibung voraus zu berechnen.

7. Gasreibung. Die Berechnung der inneren Reibung der Gase ist ein wichtiger Gegenstand der kinetischen Gastheorie. Maxwell hat lediglich unter Zugrundelegung der Voraussetzungen dieser die Größe der inneren Reibung der Gase bestimmt.

Wir geben im folgenden die Maxwellsche Betrachtungsweise in dem „typischen" Fall der Gasbewegung wieder.

Die Strömung sei eine ebene parallel der XY-Ebene (Fig. 9). Jede der XY-Ebene parallele Schicht habe eine Geschwindigkeit u, derart daß $\frac{du}{dz}$ = Konst. sei. Der Reibungs-

vorgang wird dadurch charakterisiert, daß zwischen zwei längs der Ebene Z = z strömenden Schichten eine Kraft R pro Flächen-

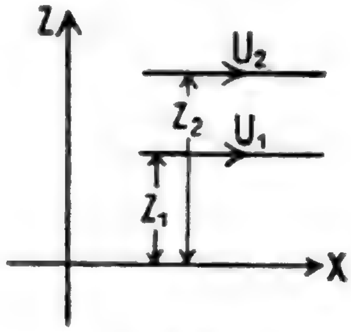


Fig. 9.

einheit wirkt, deren Betrag in erster Annäherung gleich

$$R = -\eta \frac{du}{dz}$$

angesetzt wird, wo η den Koeffizienten der Gasreibung bedeutet.

Andererseits kann man R noch als denjenigen Betrag von Bewegungsgröße auffassen, der in der Zeiteinheit von der schnellen Schicht auf die langsamere pro Flächeneinheit übergeht.

Maxwell untersucht nun die Beiträge, die die einzelnen Moleküle zu dieser Wanderung von Bewegungsgröße leisten, d. h. er summiert die Bewegungsgrößen sämtlicher in einer Schicht in der Zeiteinheit zusammenstoßender Moleküle, soweit sie von der Eigenbewegung des Gases herrühren. Diese Summe ist die der Schicht mitgeteilten Bewegungsgröße.

So findet er für den Reibungskoeffizienten den Wert

$$\eta = {}^1/_3\, c\, \lambda\, \varrho,$$

der noch heute allgemein angenommen wird.

In dieser Formel bedeuten c die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle, λ die mittlere Weglänge, ϱ die Dichte des Gases.

Die Reibungserscheinungen bei raschen Strömungen von Gasen in Röhren sowie bei Bewegung eines festen Körpers in einem Gase spielen in der Technik eine wichtige Rolle. Indessen dürften die hierher gehörigen Untersuchungen für den vorliegenden Artikel zu weit führen, weshalb wir auf die Literatur verweisen.

Literatur. **Amontons**, *Mém. de l'acad. roy. des. sc., 1699, S. 206.* — **Coulomb**, *Mém. Sav. étrang., X, S. 254.* — **Rühlmann**, *Geschichte der technischen Mechanik, 1676.* — **Petroff**, *Neue Theorie der Reibung, 1887.* — **Stribeck**, *Wesentliche Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager, Z. d. V. d. J. 1902.* — **Sommerfeld**, *Hydrodynamische Theorie der Schmiermittelreibung, Zeitschr. f. Math. und Physik, 1904.* — **Maxwell**, *Papers 1, S. 291; Phil. mag. (4), 19 (1860), S. 31.* — **Lorenz**, *Technische Hydrodynamik, 1910.* — **Derselbe**, *Technische Wärmelehre, 1904.* — **Cranz**, *Artikel „Ballistik", Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, IV, 3.*

W. Hort.

Reichenbach

Karl Ludwig von.

Geboren am 12. Februar 1788 in Stuttgart, lebte seit 1836 meist auf dem Gute Schloß Reissenberg bei Wien und starb am 19. Januar 1869 in Leipzig. Zuerst leitete er mehrere hüttenmännische Unternehmungen, besonders ein Eisenwerk in Blansko (Böhmen). Seine chemischen Untersuchungen über Meteorite und aus dem Gebiete der organischen Chemie über trockene Destillation von Holz und Braunkohlen, auch von tierischen Stoffen lehren ihn als guten Beobachter kennen. Er entdeckte dabei zahlreiche neue Stoffe, namentlich das Paraffin, Kreosot und andere technisch wichtige Substanzen. Die chemische Untersuchung derselben hat er angebahnt, aber nicht zu Ende geführt.

Seine exakten Leistungen hinderten ihn nicht, in psychologischen Fragen der Phantasie die Zügel schießen zu lassen. Er glaubte zur Erklärung der menschlichen Psyche geheimnisvolle „odisch-magnetische" Kräfte annehmen zu dürfen, und geriet durch hartnäckige Verfechtung solcher Gedanken in die heftigsten Auseinandersetzungen mit namhaften Naturforschern, z. B. Fechner, Schleiden, C. Voigt. Zahlreiche Werke geben von dieser seltsamen Gedankenrichtung Zeugnis. Eine Zusammenstellung seiner Abhandlungen und Schriften findet sich in Poggendorffs biographisch-literarischem Handwörterbuch, Band 2, Seite 594 und Band 3, Seite 1101.

E. von Meyer.

Reifung, Reifungsvorgänge

nennt man bei den Tieren die Erlangung des geschlechtsreifen Zustandes, wie auch die Ausbildung des Geschlechtsapparates. Eireifung und Samenreifung bestehen in den letzten Teilungsvorgängen der Geschlechtszellen (vgl. die Artikel „Befruchtung", „Ei und Eibildung", „Sperma").

Reil

Johann Christian.

1759 bis 1813, ordentlicher Professor und Direktor der inneren Klinik in Halle seit 1788 und in Berlin seit 1810. Er wurde zu Rhaude in Ostfriesland geboren, studierte seit 1779 in Göttingen und Halle, promovierte 1782 an letztgenannter Universität, praktizierte einige Jahre in seiner Vaterstadt und habilitierte sich in Halle, wo er seit 1789 auch Stadtphysikus war.

Reil ist einer der Hauptvertreter des Vitalismus in Deutschland, Verfasser der berühmten Abhandlung „Ueber die Lebenskraft“, die er in seinem 1796 bis 1813 in 12 Bänden herausgegebenen „Archiv für die Physiologie“ veröffentlichte. Außerdem ist er Verfasser verschiedener bahnbrechender anatomischer Arbeiten, besonders über den Bau des Gehirns und der Nerven und hat sich auch um Pflege und Ausbau der Psychiatrie im somatischen Sinne bleibende Verdienste erworben. Reil war ferner bestrebt, der praktischen Medizin durch enge Verbindung mit der Physiologie eine wissenschaftliche Grundlage zu geben.

Literatur. *Biogr. Lex. ed. Hirsch.*

J. Pagel.

Reinkultur.

1. Begriffsbestimmung der Reinkultur und Erklärung der Notwendigkeit ihrer Einführung. 2. Die verschiedenen Arten der Reinkultur. 3. Festlegung bestimmter technischer Ausdrücke. 4. Die Leistungen der Reinkultur vornehmlich in botanischer Hinsicht. a) in physiologischer, b) in systematischer Beziehung. 5. Die Mängel der Reinkultur und die Grenzen ihrer Anwendung. 6. Biologisch beachtenswerte von Tieren erzielte Reinkulturen in der Natur.

1. Begriffsbestimmung der Reinkultur und Erklärung der Notwendigkeit ihrer Einführung. Das Wort „Reinkultur“ bezeichnet 1. eine in der Bakteriologie und Botanik häufig angewendete Methodik und 2. das Produkt dieser methodischen Betätigung.

Die Reinkultur war bereits von den Medizinern weit ausgebildet, als sie in die Botanik Eingang fand und in der Zoologie gewinnt sie erst in der jüngsten Zeit Freunde und Förderer.

Zuerst sah sich der Arzt bei Krankheitsfällen vor die Notwendigkeit gestellt, unter den vielen im kranken menschlichen und tierischen Körper vorkommenden harmlosen und gefährlichen Bakterien die eigentlichen Missetäter von den ungefährlichen Bewohnern des menschlichen oder tierischen Organismus zu trennen, getrennt vom Körper leicht kontrollierbar zu ziehen und unter verschiedenen Bedingungen zu beobachten. Es wird also alles, was den Arzt in diesem Streben unterstützt, zur Gewinnung der Reinkultur geeignet sein. Reinkultur ist also ein durch die drängendste Notwendigkeit aufgezwungenes Trennungsverfahren.

Beim Botaniker und Zoologen wird das Reinkulturverfahren durch die Fragestellung diktiert. Er entnimmt beispielsweise bei einer Exkursion einem Teiche eine Schlammprobe im Versuchsgläschen oder fischt aus ihm mit feinmaschigem Netze allerlei interessante Algen oder Tiere. Ein wirres Durcheinander von Pflanzen und Tieren zeigt sich daheim dem mit dem Mikroskope bewaffneten Auge. Dieses und jenes Objekt hätte er gerne, nicht vereinzelt, nein, in großen Mengen, um den Kreislauf seiner Entwicklung zu studieren. Ein anderes Objekt mit eigenartiger Farbe sticht ihm in die Augen. Welche Beziehungen sich da wohl zwischen Farbe und Aufnahme der Nahrung ergeben könnten? Hier gar ein farbloser Organismus! Daß dieser organische Nahrung benötigt, ist wohl zu erwarten. Welche Nahrung braucht er nun? geformte oder ungeformte? Und wenn flüssige, welche? Da heißt es also auch wieder, den interessanten Organismus von den anderen sondern (= trennen, isolieren), reinkultivieren und aufmerksam studieren. Und in solchen Fällen ist die Reinkultur besonders schwer, da man auch unbedingt die lästigen Bakterien entfernen muß, die, geduldet, eine einwandfreie Beantwortung der gestellten Fragen unmöglich machen würden.

In solchen Fällen hilft also nur die Reinkultur. Die Reinkultur ist somit, ganz allgemein ausgedrückt, ein durch gewisse Fragestellungen gefordertes Trennungsverfahren von Organismen, dem das Bestreben zugrunde liegt, von einem Keime auszugehen und reine Linien zu gewinnen.

Wie verfährt man nun bei der Reinkultur?

2. Die verschiedenen Arten der Reinkulturverfahren. Das beliebteste und meist angewendete Verfahren ist das von R. Koch. Es beruht auf der Verwendung von Gelatine (R. Koch) und Agar-Agar (Frau Hesse). Wägt man die Vorteile und Nachteile beider festweichen Substrate gegeneinander ab, so kommt man zur Ansicht, daß insbesondere wegen der leichten Verflüssigung der Gelatine durch die meisten allgemein verbreiteten Bakterien und Pilze und der damit zusammenhängenden bedeutenden Erschwerung der Trennung der Organismen bei der Reinkultur dem Agar-Agar der Vorzug zu geben ist.

Ueber den Vorgang der Reinkultur von Bakterien und Pilzen nach dem Verfahren von R. Koch gibt jedes Lehrbuch der Bakteriologie Auskunft, über die anderer Mikroorganismen, insbesondere von Algen, Küsters vorzügliche Anleitung zur Kultur der Mikroorganismen.

Hat man den gewünschten Organismus reinkultiviert, so kann er in Strichen auf oder in Stichen in Gelatine oder Agar geimpft werden, man kann ihn auf Kartoffelschalen, auf Brot, in Milch usw. übertragen und sein Verhalten unter den neuen Versuchsbedingungen studieren, wie dies gleichfalls in jedem bakteriologischen Lehrbuch für die verschiedenen Bakterien geschildert wird (W. Benecke, A. Fischer, C. Flügge, F. Hüppe, E. Kramer, F. Lafar, K. B. Lehmann und R. Neumann, A. Meyer, W. Migula, E. F. Smith, E. Strasburger).

Natürlich läßt sich nicht für alle Organismen das gleiche Reinkulturrezept aufstellen, es muß vielmehr die angewendete Methode, ich möchte sagen, der Natur des reinzuzüchtenden Organismus individuell angepaßt werden. Entwickelt sich z. B. ein Organismus fast konkurrenzlos auf Bierwürzgelatine wie die Hefe oder auf 10% saurer Gelatine wie die farblose Peridinee Gymnodinium fucorum (Küster), oder bei 2% Zitronensäurezusatz zur Gelatine wie die Euglena (Zumstein), so wird man selbstverständlich diese der Natur des Organismus abgelauschten Winke ausnützen. Ebenso ließ sich die Absonderung von Schleimklümpchen und ein lebhaftes Bewegungsvermögen bei der Nitzschia putrida Benecke (O. Richter) zur Reinkultur dieser farblosen Meeresdiatomee verwerten. Die beiden Eigentümlichkeiten der Alge ermöglichten sogar die Gewinnung von Einzellkulturen, d. h. Reinkulturen, die von einer einzigen Zelle abstammten.

Bei der Reinkultur von Algen erwies sich als besonders geeignet eine Auflösung gewässerten Agar-Agars in einer mineralischen Nährlösung, das sogenannte Mineralsalzagar (MSA) (Beijerinck, O. Richter).

Daß bei Organismen, die die in der atmosphärischen Luft vorkommenden Sauerstoffmengen nicht vertragen, besondere Vorkehrungen zur Abhaltung des Sauerstoffs notwendig werden, braucht nicht erst hervorgehoben zu werden (Buchner). Man erreicht die Sauerstoff-Absorption in der Regel durch eine alkalische Lösung von Pyrogallol. Bei Purpurbakterien genügen hohe Agarschichten für diesen Zweck (Molisch). Haben Bakterien oder Pilze ein erhöhtes Wärmebedürfnis, so wird man sich natürlich auch diesen Umstand bei der Reinkultur zunutze machen (Miehe).

Endlich wird beim Kochschen Reinkulturverfahren auch noch die Zusammensetzung der Stammlösung, zu der die festweichen Substanzen zugesetzt werden sollen, und die Reaktion des Substrates zu erwägen sein. Das vorgängige Studium eines Organismus in Rohkultur wird z. B. zeigen, daß er durch Manganpepton im Wachstum ungemein gefördert werden kann, wie die Leptothrix ochracea in den Versuchen von Molisch. Es ist dann nur natürlich, daß man zur Reinkultur ein mit Manganpepton versehenes Agar benutzen wird. Das Agar- und Gelatinerezept für Purpurbakterienzucht (Molisch) wird anders ausfallen als das für Leuchtbakterien (Molisch), anders als das für farblose Meeresdiatomeen (O. Richter) usw. Näheres möge man bei diesen Autoren und in Küsters Anleitung zur Kultur von Mikroorganismen nachlesen. Was die Reaktion anlangt, so ist allgemein bekannt, daß Bakterien und Algen besser bei alkalischer, Pilze bei saurer Reaktion gedeihen.

Außer diesem in seiner gewöhnlichen Art oder mit den angedeuteten Abänderungen am meisten angewendeten Kochschen Reinkulturverfahren, kommen noch andere Reinkulturmethoden in Anwendung. So die alte Art des Herausfangens des interessanten Organismus mit einer Glaskapillare, die von Jacobsen mit vielem Erfolge zur Reinkultur von Volvocineen benutzt wurde und die sich nach Schouten auch bei der Reinkultur von Bakterien bewähren soll. Für Einzellkulturen von Hefen empfiehlt P. Lindner das Auftragen der Kulturtröpfchen mit Hefezellen auf den Objektträger mittels einer Zeichenfeder. Endlich führt die vielfache (fraktionierte) Ueberimpfung in Flüssigkeiten, die schon vor Koch geübt wurde, gleichfalls zur Reinkultur. Dabei hat selbstverständlich die mikroskopische Kontrolle in keinem Falle zu unterbleiben.

Es gibt nun auch noch Bakterien, die sich nach keinem der geschilderten Verfahren reinkultivieren lassen, weil sie an die am Orte ihres natürlichen Vorkommens herrschenden Verhältnisse so angepaßt sind, daß jede Entnahme von da ihren sicheren Tod zur Folge hat, oder weil sie die in den gewöhnlichen Nährböden vorkommenden Stoffe nicht vertragen. Ein Beispiel der ersten Art ist der Erreger der Lungenseuche der Rinder, den Nocard und Roux in den von Metchnikoff erfundenen Kollodiumsäckchen im Tierkörper zu ziehen verstanden, eines der zweiten die Nitratbakterien, die Winogradsky durch sein negatives Reinkulturverfahren zu isolieren wußte, das darin besteht, daß man gerade von solchen Stellen der Gelatineplatte auf MSA. u. dgl. abimpft, wo keine Entwickelung zu bemerken war und sich tatsächlich die im Wachstum gehemmten Nitratbakterien befinden.

Eine besondere Besprechung gebührt endlich den Doppel- (Beijerinck) oder Mischkulturen („cultures pures mixtes" Mouton). Da es nämlich bisher, abgesehen von einem von sehr geringem Erfolge gekrönten Versuche Nadsons niemals geglückt ist, Amöben oder Myxamöben bakterienfrei zu ziehen, man vielmehr stets gewöhnlich bestimmte, relativ leicht bestimm- und kultivierbare Bakterien in ihrer Gesellschaft findet und mit ihnen reinzieht, von denen sie sich nähren, mußte man sich mit diesen Mischkulturen zufrieden geben. Es gelingt nun unschwer, diesen Organismen auch andere Kost in Form anderer Bakterien als der, mit denen sie gewöhnlich vorkommen, zur Verfügung zu stellen, ja bei gewissen

Formen ist man sogar imstande, die Bakterien durch bestimmte Hefen zu ersetzen, wie Beijerinck gezeigt hat. Diese Amöben- und Myxamöbenkulturen unterscheiden sich also ganz wesentlich von anderen Reinkulturen, indem sie aus zwei Organismenarten bestehen, die zueinander gehören wie Tier und Futter.

Ebenso sind die Kulturen Bonniers von Algen und Pilzen als Flechten typische Doppelkulturen.

Werden endlich Amöben-Hefe- und Amöben-Bakterien-Doppelkulturen miteinander gemengt, so entstehen Tripelkulturen (Beijerinck).

3. Festlegung bestimmter technischer Ausdrücke. Schon bei Darstellung der Reinkulturverfahren, insbesondere an den Stellen, wo von der Zucht von Amöben bei Gegenwart von Bakterien und der Einzellkultur die Rede war, und im Hinblick auf den Umstand, daß für gewisse Fragen auch mit Bakterien verunreinigte Kulturen von Algen vollauf genügen, erscheint eine klare und kurze Bezeichnungsweise für die verschiedenen Abstufungen und Sorten der Reinkulturen ein Bedürfnis.

a. R. = absolute Reinkultur, bezeichne eine Kultur eines Organismus, bei der jeder andere Organismus fehlt.

E.-R. = Einzell-Kultur, sei die Bezeichnung einer Reinkultur (a. R), die von einer einzigen Zelle ausgeht. Dieser Name hat in der Literatur bereits immer festeren Boden gefaßt.

Sp.-R. = Spezies-Reinkultur, sei empfohlen für Zuchten von Algen, Amöben, Myxamöben u. a., wenn die betreffende Kultur lediglich mit unbekannten Bakterien, sonst aber mit keinem Organismus verunreinigt ist.

D.-R. = Doppel- oder gemischte Reinkultur, mögen weiter Reinkulturen von Flechten sowie die oben geschilderten Kulturen von Amöben genannt werden, zu denen man die Futterbakterie oder Futterhefe als zwar nicht zu vermeidende, aber absichtliche, wohl gewählte und genau bekannte Zutat hinzugibt.

T.-R. = Tripelkultur ist endlich eine Kombinationskultur von Amöben, Bakterien und Hefen.

4. Die Leistungen der Reinkultur vornehmlich in botanischer Hinsicht. 4a) In physiologischer Beziehung. α) Algen. Da man einsehen gelernt hat, daß Sp.-R. von Algen bei physiologischen Untersuchungen nicht ausreichen, weil, um nur ein Beispiel zu nennen, bei Fragen nach der Assimilation organisch gebundenen Stickstoffs nie mit Bestimmtheit erklärt werden kann, ob die gebotene Verbindung als solche oder von Bakterien gelieferte Spaltungsprodukte derselben assimiliert werden, hat man für physiologische Fragen stets a. R. zu verwenden getrachtet.

Die Untersuchungen Beijerincks, Krügers, Artaris, Matruchots, Molliards, Grintzescos u. a. haben unzweifelhaft gezeigt, daß Grünalgen —, Miquels, meine und Meinholds Experimente, daß braune und farblose Diatomeen —, die Versuche Küsters, daß eine farblose Peridinee, das Gymnodinium fucorum, N-freie und N-haltige organische Verbindungen zu assimilieren vermögen. Dabei kommt vielen Grünalgen und den Diatomeen die Fähigkeit zustatten, ein tryptisches Ferment auszuscheiden, das leicht durch Gelatineverflüssigung und Kaseinlösung in Milchagar nachgewiesen werden kann (Fig. 1 und 2, S. 209). Nach Bouilhac, Etard, Matruchot, Molliard und Chodat sollen übrigens auch durch Blaualgen Kohlehydrate assimiliert werden.

Bei den erwähnten Versuchen zeigte sich, daß Grünalgen auch im Dunkeln mit grüner Farbe zu wachsen vermögen und, was noch interessanter ist, auf bestimmten organischen Verbindungen ihre Farbe verlieren und so zu typischen Saprophyten werden, die aber auf denselben Substanzen im Lichte oder beim Uebertragen auf geeignete andere Verbindungen im Dunkeln ihre grüne Farbe wieder zu gewinnen vermögen. Ebenso konnte Zumstein (1900) die a. r.[1]) gezüchteten Euglenen auf organischen Substanzen im Dunkeln zur Farbstoffaufgabe zwingen und im Lichte wieder ergrünen lassen. Bei braunen Diatomeen ruft Zucht auf bestimmten organischen Verbindungen eine Steigerung der Phäophyllbildung hervor (O. Richter 1906). Von großem Interesse ist die Auflösung des Agar-Agars durch Diatomeen, eine Fähigkeit, die diese Algen nur mit dem Bacillus gelaticus Gran teilen. Endlich hat sich auch bei der Frage nach der Assimilation des atmosphärischen N durch Algen die a. R. bewährt und erwiesen, daß bisher keine Alge bekannt ist, die den elementaren N assimiliert.

β) Bakterien. Um die Bedeutung der Reinkultur der Bakterien richtig einschätzen zu können, braucht nur bedacht zu werden, daß die ganze junge Wissenschaft Bakteriologie, die moderne Hygiene, die sterile Wundbehandlung und die prophylaktischen Methoden der Medizin, das ganze moderne Heilverfahren, die heutigen Gesetzesvorschriften über Seuchenschutz, die Quarantäne u. v. a. ohne die Erfahrungen der Reinkultur absolut undenkbar sind. Das gleiche gilt für eine ganze Anzahl technischer Betriebe und landwirtschaftlicher Errungenschaften, wie die der Rotte (Fribes, Störmer, Steglich),

[1]) a. r. = absolut rein.

die Zerstörung von Zellulose durch Bakterien (Omelianski, v. Iterson, Merker), die Frage erbungslehre studiert, wichtige Ergebnisse für die Mutationstheorie erzielt und hat,

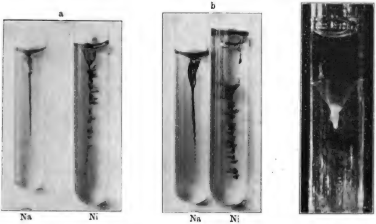


Fig. 1. Darstellung des Verlaufes der durch die Tätigkeit von Diatomeen hervorgerufenen Gelatineverflüssigung (Original). a und b Stichkulturen von Navicula minuscula, Grun. (Na) und Nitzschia Palea, Kütz. (Ni) in Gelatine. a nach 10, b nach 30 Tagen aufgenommen. Man sieht das allmähliche Vorschreiten der Verflüssigung und das Zusammensintern der Diatomeen. Ueberdies beachte man den wesentlichen Unterschied in der Stichform bei Navicula und Nitzschia. c etwa 1 Monat alte Gelatinestichkultur der Nitzschia putrida Benecke. Die farblosen Diatomeen sind trichterförmig zusammengesintert.

des Stickstoff-Kreislaufes mit seinen Bakterien der Harnstoffvergärung (Miquel), den Nitrifikationsorganismen, den Nitroso- und Nitrobakterien (Winogradsky, Omelianski), die der Assimilation elementaren Stickstoffs (Winogradsky, A. Koch), die interessante, für den Landmann so wichtige Symbiose der Leguminosen mit den Knöllchenbakterien (Beijerinck, Prażmovski, A. Koch, Nobbe, Hiltner, Störmer, Stutzer) und die damit zusammenhängende Darstellung des Nitragins, das sind a. R. der Knöllchenbakterien u. v. a. m. (vgl. Lafar, Kossowicz). Auch physiologisch hochinteressante Bakteriengruppen wie die Purpur-, Eisen- und Leuchtbakterien haben in jüngster Zeit eine eingehende Behandlung erfahren (Molisch).

γ) Eumyzeten. αα) Die Hefe. Theoretische und praktische Interessen haben das Studium der Hefe zu einer Art Wissenschaft für sich werden lassen. Man hat mit dem in a. R. befindlichen Pilze Versuche über dessen N-Ernährung, über seine systematische Stellung, über seine Hauptbrutstätte, seinen Winteraufenthalt, seine Verbreitung durch Wind, Regen und Insekten, seine Askus- und Askosporenbildung, über seine Akklimatisation gemacht, mit ihm Probleme der Ver-

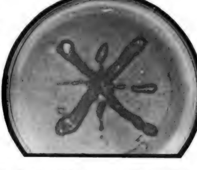


Fig. 2. Nachweis eines tryptischen Fermentes bei der Nitzschia putrida B. durch Auflösung des Milchkaseins im Hastingsschen Milchagar. Original. Die dunkeln Zonen sind die durch die Auflösung des Kaseins durchsichtig gewordenen Partien der Milchagarplatte. Die hellen Linien darin sind die Striche der farblosen Diatomee. Der hellere Grund zeigt die noch unaufgelösten Milchkaseinmassen im Agar. Das Bild ist vor schwarzem Hintergrund aufgenommen.

auf dem Prinzipe der Reinkultur fußend, eine völlige Umgestaltung der Brauanlagen vorgenommen, wie sie in den modernen Reinkultursystemen zum Ausdruck kommt. (Hansen, Laurent, Beijerinck, Artari Ad. Mayer, Klöcker, Hašek, Lindner, Kues, Kruis u. a.).

Daß die Reinkultur übrigens auch bei der Weinbereitung heute eine große Rolle spielt, zeigen die Untersuchungen von Müller-Thurgau, der durch vorgängiges Eintragen von a. R. von Hefe in Traubenmost und deren rapide Vermehrung das Aufkommen der anderen Organismen verhindert und auf diese Art jene Hefe zum allein maßgebenden Organismus macht, deren Eigenschaften man schätzt.

ββ) Andere Pilze. Das große Verdienst, auf dem Gebiete der Mykologie die Forderung der Reinkultur aufgestellt zu haben, gebührt de Bary, der selbst die Zugehörigkeit des Aspergillus zu den Askomyzeten erkannt hat. Sein Schüler Brefeld erzielte die Askusfruchtkörper von Penicillium, klärte die Beziehungen zwischen Mucor und seinen Parasiten auf und kultivierte noch eine ganze Anzahl höherer Pilze u. a. den Hallimasch bis zur Rhizomorphabildung, den Molisch bis zur Hutbildung im Kolben brachte. Außer diesem sind derzeit noch der Champignon, die Morchel, der Agaricus fabaceus und villaticus in a. R. zur Fruchtkörperbildung gebracht worden (Duggar) und von der Trüffel ist bereits die Myzelbildung erzielt (Boulanger).

Von praktischem Interesse sind auch die auf a. R. fußenden Studien der holzzerstörenden Pilze (v. Tubeuf), von physiologischem die der leuchtenden Pilze (Brefeld, Molisch) und die von Blakeslee entdeckte Zweigeschlechtigkeit der Mucorineen, die ihrerseits wieder wichtige Bastardierungsversuche, Experimente über die Erkennung des Geschlechtes neu eingefangener Mucorineen, Versuche über Degeneration durch Inzucht usw. zur Folge hatten (vgl. auch Hagems einschlägige Befunde mit Mucorineen aus Norwegen). Es seien weiter als physiologisch interessant Wehmers Monographie des Aspergillus und Miehes Studien über die Selbsterhitzung des Heus sowie Hickels Beobachtungen über den Soorpilz hervorgehoben. In ernährungsphysiologischer Beziehung haben Molisch, Benecke, Loew u. v. a. wertvolle Resultate mit niederen Pilzen erzielt, exakte Versuche über die Ernährung höherer Pilze liegen dagegen bis heute noch nicht vor. Auf a. R. basierende entwickelungsgeschichtliche Studien mit Askomyzeten rühren endlich von Claussen her.

δ) Die Reinkultur als Mittel zur Ueberprüfung der Verhältnisse der Symbiose. αα) Flechten. Waren auch durch Schwendeners anatomische Studien (1860), durch Stahls interessantes Experiment über die Vereinigung von Algen und Pilzen zu Flechten in Rohkulturen (1877) und durch de Barys biologische Betrachtung (1879) die Flechten als Doppelwesen erkannt, so konnte doch erst das Studium a. R. der Komponenten und deren neuerliche Synthese in D.-R. das völlige Verständnis dieser interessanten Organismen bringen (Möller, Bonnier, Beijerinck, Artari, Treboux, Tobler). Es zeigte sich, daß die Grünalgen aus Flechten in vielen Fällen geradezu als typische Peptonalgen zu bezeichnen sind, daß sie in anderen wieder die vom Pilze gebildete Oxalsäure aufzunehmen scheinen, also nicht bloß als Lieferanten organischer Substanz an den Pilz aufgefaßt werden dürfen, sondern auch von ihm recht hoch zusammengesetzte Stoffe beziehen. Da durch Treboux' jüngste Arbeit jedoch besonders Artaris wichtige Ergebnisse über ernährungsphysiologische Rassen von Algen in Frage gestellt werden, haben hier neue Versuche mit a. R. und D.-R. einzusetzen.

ββ) Symbiose von Algen mit Moosen. Ebenso werden die anatomisch (Reinke, Janczewski, Strasburger) oft sehr genau studierten Vergesellschaftungen von Algen mit Moosen, dem Wasserfarn Azolla, den Cycadeen und Gunnera nur durch das Studium a. R. der Algen und die Beobachtung der algenfrei gezogenen Wirtspflanzen erschöpfend erklärt werden.

γγ) Symbiosen höherer Pflanzen mit Pilzen und Bakterien. Jüngst fanden das Orchideenproblem durch Noël Bernard und Burgheff, die Knöllchenbildungen von Alnus und Myrica durch Peklo eine erschöpfende Behandlung. Wir wissen heute, daß sich die Pilze der verschiedensten Orchideen außerhalb der Pflanzen a. r. züchten lassen, kennen ihre ganze Ernährungsphysiologie und ihre Notwendigkeit für das Auskeimen vieler Orchideensamen. Ebenso sind wir über die Natur der Endophyten von Alnus und Myrica und ihre Kulturbedingungen unterrichtet. Es handelt sich in diesem Falle um typische Aktinomyzeten, mit denen wenigstens bei Erlenpflänzchen Infektionsversuche gelangen. Ebenso glückte Ternetz (1904) die Reinkultur des Ericaceenpilzes und Faber und Miehe (1912) die der Bakterien der Rubiaceen und Ardisien. Von den Knöllchenbakterien der Leguminosen war oben die Rede.

ε) Die Bedeutung der Reinkultur zum Nachweis von unsichtbaren Krankheitserregern und Ultramikroorganismen. Der Umstand, daß bei einer Anzahl von Krankheiten von Menschen, Tieren und Pflanzen trotz der hohen Entwickelung der

Reinkulturmethode keine Krankheitserreger gefunden wurden, führte zu völlig neuen Gedankengängen, auch ein Verdienst der Reinkultur. Beijerinck nahm bei den fleckenkranken Tabakblättern eine übertragbare, vermehrungsfähige Flüssigkeit, das Contagium vivum fluidum, Hunger bei denselben Objekten und Baur bei panachierten Malven ein „physiologisch-autokatalytisch wirkendes Krankheitstoxin" an, dessen Existenz durch eine Menge Versuche wahrscheinlich gemacht werden konnte.

Ebenso hat die bakteriologische Technik vorläufig gegen die Existenz ultramikroskopischer Organismen entschieden, da noch stets in auftretenden Kolonien die Koloniebildner als Organismen erkannt werden konnten (Molisch).

4b) In systematischer Beziehung.

α) Die Hypothese der Pleomorphie und die Anamorphose des Protoplasmas. Durch Tulasnes und de Barys berühmte Untersuchungen war die Vielgestaltigkeit der Reproduktionsorgane von Pilzen nachgewiesen worden, wofür Tulasne den Ausdruck Pleomorphismus prägte. Minder kritische Naturen als die beiden Forscher brachten nun die verschiedensten zufällig an einem Platze wachsenden Pilze, Bakterien oder Algen in einen genetischen Zusammenhang und redeten von der Umwandlungsfähigkeit von Pilz in Pilz, Bakterie in Bakterie und Alge in Alge.

Damit war es zu einer völligen Umwertung des Begriffes der Pleomorphie gekommen. Das Wort Pleomorphie bezeichnet in dieser Form eine Irrlehre, die auf mykologischem Gebiete von Hallier, Bail und Hoffmann, auf bakteriologischem trotz F. Cohns systematischen Studien von Billroth, v. Nägeli und Buchner und auf algologischem Gebiete abgesehen von Agardh, Meyen, Kützing, Fresenius, von Sirodot, Peter, Chodat, Grintzesco und Borzi vertreten und in neuester Zeit von Dunbar in der Form aufgefrischt wurde, daß er eine Umwandlung von Algen in Bakterien und Pilze lehrte. Welche furchtbare Konsequenzen eine solche Lehre für das praktische Leben, insbesondere den Gemütszustand der Menschen haben müßte, leuchtet ein, wenn man sich vorstellt, daß nach v. Nägelis Anschauungen die gleiche Spezies von Bakterien im Laufe von Jahren und Jahrzehnten bald die Säuerung der Milch, bald die Buttersäurebildung im Sauerkraut, bald Typhus, bald rekurrierendes Fieber, bald Cholera, bald Wechselfieber erzeugen könnte. Glücklicherweise haben sich auf jedem der drei genannten Gebiete Gegner der Pleomorphie gefunden und die Irrlehre zurückgewiesen, auf mykologischem Gebiete de Bary und Brefeld, auf bakteriologischem F. Cohn und R. Koch, auf algologischem Klebs, Artari und Senn. Und wenn schließlich die „Antipleomorphisten" zum Siege gelangten, so ist es in erster Linie der Forderung nach Beobachtung der Kontinuität des Entwicklungsganges und damit de Bary zu danken, der diese Forderung immer wieder, unbekümmert um die mit der Kleinheit der Objekte wachsenden Schwierigkeiten, gestellt hat. Diese Forderung ist von allen Antipleomorphisten hochgehalten worden. In zweiter Linie aber gebührt das Verdienst am Siege über die Pleomorphie der Reinkultur, ohne die eine Befolgung der ersten Forderung oft absolut unmöglich gewesen wäre. Nach diesen Ausführungen erübrigt es sich natürlich auch, auf die von Dunbar neuerdings aufgefrischten Pleomorphieideen einzugehen.

Daß selbstredend die bakteriologische Technik und die mit ihr unzertrennlich verquickte Reinkulturmethode auch jene Irrtümer beseitigte, die man als Anamorphose des Plasmas, als eine Umwandlung des Protoplasmas irgendwelcher Pflanzen in Bakterien und andere Mikroorganismen bezeichnete und die von Th. Hartig, v. Nägeli, H. Karsten, Wigand, Nüesch und Béchamp vertreten wurde, sei gleichfalls vermerkt. Die durch die Reinkultur unterstützte exakte Forschung hat die anscheinend beobachtete Generatio aequivoca als für unsere Zeit nicht nachweisbar (Pasteur u. a.) und auch die mit der Pleomorphie in vieler Beziehung verwandte Hypothese der Anamorphose des Plasmas als wertloses Phantasieprodukt erkannt.

β) Andere systematische Ergebnisse. Die Anwendung der festweichen Substrate bei der Reinkultur brachte es wiederholt mit sich, daß die kultivierten Formen von Algen unter den geänderten Versuchsbedingungen abnorm wuchsen. Derartige Erfahrungen machten schon Beijerinck mit Scenedesmus acutus, ebenso Klebs mit Hormidium u. a., Senn mit Scenedesmus quadricauda, Küster mit Gymnodinium fucorum, ich mit Asterionella, der Nitzschia putrida B. und v. a. m. Bei meinen Versuchen mit Diatomeen hat sich auch eine interessante Beziehung zwischen Individuenform und Speziesgestalt und Kolonieform ergeben. Auch bei Zumsteins Untersuchungen über die Zusammengehörigkeit der Euglenen und Astasien, Th. Franks Befunden über Chlamydomonas, Wollenwebers Arbeit über Hämatococcus und Nadsons Publikation über die sogenannten „grünen Bakterien" war Reinkultur Vorbedingung.

In bakteriologischer Hinsicht nenne ich Miehes Studien über den Tuberkelbazillus, die ihn zur Aufstellung der Familie

14*

der Mycobacteriaceae oder Pilzbakterien geführt haben, ferner die Monographien von Molisch über Purpur- und Eisenbakterien und seine und Reinelts Studien über Leuchtbakterien. Mit einer ganz neuen Gruppe von Bakterien sind wir durch die Studien Thaxters, Baurs und Jahns bekannt geworden, den Myxobakterien, die in eigentümlichen an die Myxomyzetenplasmodien erinnernden Straßen wachsen und sich zu gesetzmäßig geformten Fruchtkörpern zusammenfügen, die Myxomyzetenfruchtkörpern täuschend ähnlich sehen.

In das Studium der Fungi imperfecti hat Klebahn die Sp.-R. eingeführt und für eine ganze Anzahl dieser Pilze die systematische Stellung klargelegt. A. R. benutzte dagegen Hiekel zur Aufklärung der Systematik des Soorpilzes.

Was endlich die Systematik der Eumyzeten anlangt, so sei nochmals auf Wehmers Monographie der Pilzgattung Aspergillus, de Barys, Brefelds, Blakeslees Arbeiten und auf Duggars Zuchtversuche mit höheren Eumyzeten verwiesen.

Anhangsweise sei hier noch vermerkt, daß nun auch zur Klärung gewisser Fragen auf zoologischem Gebiete die Reinkultur gepflegt wird. Man zieht Amöben, Infusorien, Daphnien u. dgl. (Beijerinck, Celli, Paolo, Enriquez, Woltereck, Langhans) und verwendet nun auch Algenreinkulturen zu Fütterungszwecken, um den Zuchtobjekten eine möglichst gleichartige Nahrung zu bieten.

5. Die Mängel der Reinkultur. Der wesentlichste Einwand, den man gegen die Anwendung der a. R. erhebt, ist der, daß der Züchter sein Kulturobjekt dem Kampfe ums Dasein mit all seinen Gefahren und Beschwerden entrückt. Tatsächlich befindet sich der in a. R. gehaltene Organismus nicht unter normalen Verhältnissen, er hat keine Bakteriengifte zu fürchten, keine Verfolgung durch artfremde Organismen zu erdulden usf. Wie aber will man ihn erschöpfend studieren, wenn man ihn nicht völlig in der Gewalt hat? Wie will man z. B. erfahren, ob er Eiweiß löst, welche organische Verbindungen er assimiliert u. a. m.? Auf welche Faktoren will man allenfalls beobachtete Formveränderungen zurückführen, wenn der Organismus noch in Rohkultur vorliegt? Mag daher die a. R. immerhin den angedeuteten Nachteil haben, so sind doch die Vorteile um soviel zahlreicher, daß ihre Anwendung eine unerläßliche Forderung biologischer Forschung bleiben wird. Es gibt übrigens auch Mittel, den angedeuteten Nachteil abzuschwächen: das vergleichende Studium von Roh- und Reinkulturen, das Rückversetzen reingezogener Objekte in die ursprünglichen Bedingungen, endlich die Zucht jedes am natürlichen Standorte vorkommenden Partners und Kombinationskulturen von ihm und jedem einzelnen Partner und dann mit mehreren Partnern und schließlich mit allen zusammen, um so jedwedes einzelnen und schließlich aller zusammen Einfluß auf den interessanten Organismus zu studieren.

6. Biologisch beachtenswerte von Tieren erzielte Reinkulturen in der Natur. Es ist nun gar nicht uninteressant, daß Tiere mit mehr oder weniger Vollkommenheit Reinkulturen von Pilzen herzustellen imstande sind. Auch ist die Methodik je nach der Tiergattung verschieden. Die tropischen Atta-Arten (Ameisen) z. B. erzielen mit ihrer Jätmethode so vollkommene Reinkulturen, daß die Uebertragung der charakteristischen Kohlrabihäufchen des gezüchteten Pilzes, Rozites gongylophora Möll., durch Möller auf die üblichen Nährböden, sofort a. R. des Pilzes ergab. Nach v. Lagerheim züchtet übrigens auch eine heimische Ameise, Lasius fuliginosus, einen Pilz. Am wenigsten weit haben es die Termiten in der Reinkultur gebracht. Bei ihnen hat bloß der Verdauungsprozeß die Sterilisation zu bewerkstelligen und die ist nun keine sehr vollkommene, so daß unter den aus den abgelegten Pilzsporen aufkommenden Pilzen stets auch reichlich „Unkraut“ vorhanden ist (Petsch, v. Höhnel). Bei den Ambrosiagallmücken und den Borkenkäfern weiß man über die Art der Impfung noch überhaupt nichts, doch läßt sich vermuten, daß das Muttertier die Uebertragung der Impfmasse besorgt. Bei beiden Tierarten sind die Kulturen sehr rein, besonders von dem Nährpilze (Ambrosia) des Borkenkäfers konnte Neger sofort a. R. erzielen. Die Reinheit wird hauptsächlich durch den Einschluß von Nahrungspilz und Larve in der Gallenhöhlung bezw. durch die Anlage der Gänge bewerkstelligt, die aus einem radialen kurzen und zwei dazu senkrecht verlaufenden vielfach gewellten Gängen bestehen und nach demselben Prinzip wirken wie die Petrischalen und Pasteurkolben. Die in den Nischen auftretenden Pilze liegen in „prachtvoller Reinheit“ vor (Neger [1909], Baccarini, Trotter, Neger u. a.).

Literatur. *Die einschlägige Literatur mag in folgenden Publikationen nachgelesen werden:* **O. Richter**, *„Die Bedeutung der Reinkultur“. Eine Literaturstudie. Berlin 1907.* — **Derselbe**, *„Die Ernährung der Algen“. Leipzig 1911.* — **Derselbe**, *„Die Reinkultur und die durch sie erzielten Fortschritte, vornehmlich auf botanischem Gebiete“. Progressus rei bot. 1913.*

O. Richter.

Reizerscheinungen der Pflanzen.
I. Allgemeiner Teil.

1. Begriff der Reizerscheinung. 2. Reizmittel, Reizanlaß und Reizreaktion. 3. Vergleich der Reizerscheinungen mit anderen Auslösungen. 4. Vergleich der reizbaren Pflanze mit einem Mechanismus. 5. Komplikation des Reizprozesses. a) Gliederung in Reizaufnahme, Leitung, Reaktion. b) Regulationen. c) Stimmung. 6. Reizerscheinungen der Pflanzen verglichen mit denen der Tiere.

1. Begriff der Reizerscheinung. Während man früher einige wenige Pflanzen, so vor allen Dingen die berühmte Sinnpflanze, Mimosa pudica, für reizbar hielt, hat sich im Laufe des 19. Jahrhunderts, ganz besonders durch Ch. Darwin, J. Sachs und W. Pfeffer immer mehr die Ansicht Geltung verschafft, daß allen Organismen Reizbarkeit zukommt. Die Reizbarkeit äußert sich nicht bloß in einzelnen in die Augen fallenden, weil rasch verlaufenden Bewegungen, sondern sie durchzieht das ganze Lebensgetriebe so sehr, daß man sich heute Leben ohne Reizbarkeit gar nicht mehr vorzustellen vermag.

Man versteht unter Reizbarkeit die besondere Art des Organismus, auf die verschiedensten Einwirkungen zu reagieren, eine Art, die leblosen Naturkörpern abgeht, aber bei Mechanismen sich wiederfindet. Charakteristisch für die Reizerscheinungen ist kurz gesagt, daß die Ursache der Erscheinung, der Reiz, nicht in einer einfachen und direkten Beziehung zur Endwirkung, der Reizreaktion, steht; der Reiz liefert nicht die Energie für das Geschehen, er löst vielmehr andere Energien im Organismus aus. Reiz ist also gleichbedeutend mit Auslösung. Wenn man dennoch das besondere Wort „Reiz" beibehält, so will man damit andeuten, daß es sich bei Reizerscheinungen um Auslösungen in Organismen handelt, bei denen unter allen Umständen das Protoplasma eine Rolle spielt. Wegen der Mitwirkung des Protoplasmas sind die Reizerscheinungen sehr komplizierte Erscheinungen, und wir übersehen in keinem einzigen Falle die Einzelheiten der Vorgänge auch nur annähernd so vollkommen wie in einem Mechanismus.

Die dem Laien bekannteste Reizerscheinung ist wohl der Phototropismus. Jedermann hat Gelegenheit zu beobachten, daß Pflanzen, die im Zimmer gehalten werden, sich dem durch das Fenster einfallenden Licht zukrümmen. In diesem Falle ist auch leicht einzusehen, daß das Licht nicht die Pflanze anzieht wie der Magnet das Eisen, sondern daß es nur in der Pflanze schlummernde Kräfte auslösen kann, die dann die Arbeit der Bewegung leisten. In diesem Beispiel, wie auch bei vielen anderen Reizerscheinungen, zeigt sich zugleich, daß der Reizeffekt für den Organismus nützlich ist, da ja die Pflanze, speziell ihre Blätter, das Licht nötig haben. Schon aus diesem Grunde, weil der Organismus durch seine Reizbarkeit in günstige Verhältnisse geführt, vor ungünstigen bewahrt wird, begreift man die Notwendigkeit der Reizbarkeit für sein Bestehen.

2. Reizmittel. Reizanlaß. Reizreaktion. Bei jeder Reizerscheinung hat man erstens den Reiz (das Reizmittel) festzustellen, zweitens die spezielle Art seiner Einwirkung (Reizanlaß) zu konstatieren und drittens die Art der ausgelösten Reaktion zu beobachten.

2a) Reizmittel. Man unterscheidet zwischen äußeren und inneren Reizen. Nur die äußeren sind leicht feststellbar, sie allein sind ferner willkürlich variabel sowohl in Beziehung auf ihre Qualität, als auf Intensität, Richtung und Dauer. Dementsprechend kann man in der Regel nur die äußeren Reize experimentell erforschen.

Aeußere Reize. Fast alle uns bekannten Naturkräfte können Reize für die Pflanze abgeben, so zunächst strahlende Energie (die sich als Elektrizität, Licht, Wärme äußert), dann geleitete Wärme, mechanische Einwirkungen (Schwerkraft, Schleuderkraft oder andere, Zug, Druck oder schließlich auch Verwundungen herbeiführende Kräfte), endlich die chemischen Wirkungen von Stoffen aller Art, mögen diese im einzelnen als Nährstoffe nötig, oder überflüssig, oder gar schädlich (Gifte) sein. Man spricht dementsprechend von elektrischen, photischen, thermischen Reizen, von Schwerkraftreiz, mechanischen und chemischen Reizen. Die gleichen Reize spielen auch im Tierreiche eine Rolle. Es fehlt aber der Pflanze die Reizbarkeit durch Schallwellen und es fehlt allen Organismen für gewöhnlich die Reizbarkeit durch magnetische Kräfte.

Innere Reize. Die inneren Reize können in zwei Gruppen gebracht werden, je nachdem sie von lebenden Teilen der Pflanze ausgehen, die dem Orte, an dem die Reaktion erfolgt, benachbart sind, oder am Ort der Reaktion selbst auftreten. Tatsächlich hängen die Glieder einer Pflanze, die Teile einer Zelle so eng miteinander zusammen, daß jede Aenderung an einer Stelle als Reiz in der benachbarten wirkt. Solche Wechselwirkungen werden als „Korrelationen" bezeichnet. Im einzelnen ist freilich nicht bekannt, worauf sie eigentlich beruhen. Zweifellos handelt es sich um komplizierte Beziehungen, doch sind in letzter Linie immer nur wieder die gleichen Wirkungen denkbar wie bei Außenreizen. Ein Organ wird also

durch Druck oder Zug und vor allem durch chemische Wirkung, unter Umständen aber auch durch Wärme-, Licht- oder Elektrizitätsproduktion auf sein Nachbarorgan einwirken können. Für das beeinflußte Organ ist in solchen Fällen das beeinflussende gerade wie ein Stück Außenwelt. Demnach kann man solche Korrelationsreize auch unter den äußeren Reizen aufführen und wird dann den Ausdruck „innere Reize" auf solche beschränken, die aus einer Veränderung der reizbaren Substanz selbst, des Protoplasmas, entspringen. Es ist aber im Einzelfall recht schwierig zu sagen, wo die Korrelationsreize aufhören und die „eigentlichen" inneren Reize beginnen, schon deshalb, weil wir ja auch im sogenannten Protoplasma noch Teile erwarten können, die nicht reizbar sind. Im übrigen wissen wir von den inneren Reizen so gut wie nichts. Wir schließen auf ihre Existenz daraus, daß gewisse Erfolge an der Pflanze bei ganz konstanten Außenbedingungen eintreten können, Erfolge, die durchaus den durch Außenreize bedingten gleichen, die also vermutlich auch als Reizwirkungen zu betrachten sein werden (autonome Bewegungen).

2b) Reizanlaß. In vielen Fällen genügt das einfache Vorhandensein des Reizmittels — vorausgesetzt, daß seine Intensität und Dauer genügend groß ist — um an der reaktionsfähigen Pflanze eine Reizerscheinung auszulösen. Alle für das Leben unentbehrlichen Faktoren müssen in diesem Sinn als Reize betrachtet werden. So ermöglicht ja bekanntlich eine gewisse nicht zu hohe und nicht zu niedrige Temperatur erst den Stoffwechsel, das Wachstum usw.

Für gewöhnlich sieht man aber von den durch die normalen Lebensbedingungen erzielten „stationären" Reizen ab und betrachtet nur diejenigen Einwirkungen als Reize, die durch Veränderungen im bisherigen Zustand erzielt werden. Die Veränderungen aber können entweder im Raum oder in der Zeit erfolgen. Wenn eine Veränderung nur in der Zeit stattfinden soll, muß ein bisher schon wirkender Faktor fernerhin seine Qualität oder Intensität ändern, oder ein neuer Faktor muß zu den bisherigen hinzutreten; dabei kann die Veränderung an dem reizbaren Organ allseits gleichmäßig erfolgen. Wir nennen solche Reize diffuse oder homogene. Besteht dagegen die Veränderung darin, daß ein Faktor einseitig ein Organ trifft (räumliche Aenderung) oder wenigstens die eine Seite mehr als die anderen, so spricht man von einseitigen oder anomogenen Reizen. Als Beispiele für diffuse Reizung führen wir an: das Fallen oder Steigen der Temperatur, die Veränderung der Lichtintensität und Lichtqualität, oder überhaupt das Auftreten von Licht nach zuvoriger Dunkelheit, endlich das Auftreten von Aetherdampf in einer zuvor reinen Atmosphäre. Als Beispiele für anomogene Reizung seien angeführt eine einseitige Erwärmung, eine einseitige Beleuchtung, eine einseitige Einwirkung von Chemikalien. Es kann also ein und dasselbe Reizmittel zu diffuser wie zu anomogener Reizung führen, und deshalb hat man nicht nur vom Reizmittel, sondern auch vom Reizanlaß, d. h. der Art der Einwirkung des Mittels zu reden. — Unter Umständen kann übrigens auch ein an sich homogener Reiz zu anomogener Reizung führen, nämlich dann, wenn die Pflanze durch ihren Bau eine nur einseitige Wirkung des Reizes gestattet. So kann z. B. eine nur einseitig vorhandene Permeabilität der Cuticula oder die einseitige Anordnung von Spaltöffnungen die Einwirkung eines allseitig vorhandenen Stoffes in der Pflanze zu einer einseitigen machen; in anderen Fällen ist die Ursache der anomogenen Reizung durch homogene Reize weniger durchsichtig.

2c) Reizreaktion. Von Reizen, die unseren eigenen Körper treffen, erlangen wir wenigstens vielfach dadurch Kenntnis, daß sie uns „zu Bewußtsein kommen". Bei allen anderen Organismen aber wissen wir über die Existenz eines Bewußtseins nichts und da können wir die Existenz der Reizbarkeit nur daran erkennen, daß einem Reiz früher oder später eine Reaktion folgt. Diese Reaktion kann darin bestehen, daß eine schon im Gange befindliche Aktion beschleunigt, gehemmt oder in andere Bahnen gelenkt wird, oder daß neue Aktionen ausgelöst werden. Die Aktionen selbst aber können sich entweder im Stoffwechsel oder im Formwechsel oder im Ortswechsel äußern, genauer gesagt, sie können ihren Hauptausdruck, den uns am meisten auffallenden Effekt, auf einem der genannten Gebiete haben.

α) Stoffwechseländerungen. Auffällige Beispiele für Stoffwechseländerungen finden sich bei Insektivoren, wenn diese nach chemischer Reizung Säure und Enzyme ausscheiden, bei Pilzen, wenn diese ein Substrat bis zu einer gewissen Grenze ansäuern, bei Bakterien, wenn sie auf einem Substrat bestimmter Zusammensetzung ein Enzym ausscheiden, das auf einem anderen Substrat nicht gebildet wird. Man darf aber nicht glauben, daß Stoffwechsel-Reizreaktionen sich auf solche einzelne Vorkommnisse beschränken, man muß sich vielmehr darüber klar sein, daß bei allen oder der Mehrzahl aller Reizerfolge auch chemische Aenderungen mit den zunächst in die

Augen fallenden Form- und Ortsveränderungen Hand in Hand gehen.

β) Formwechsel. Die Form der Pflanze wird durch Wachstum bestimmt; das Wachstum selbst aber ist ein Reizerfolg, es kann durch bestimmte Reize angeregt, durch andere ausgelöscht werden. Doch für gewöhnlich denkt man, wenn man von formbedingenden morphogenen Reizen spricht, nicht an die allgemeinen Wachstumsreize, sondern an andere, die den normalen Verlauf des Wachstums irgendwie ändern. Da es durchaus konventionell ist, was als „normal" und was als abgeändert bezeichnet werden soll, so ist von vornherein klar, daß eine scharfe Grenze zwischen den allgemeinen und den morphogenen Reizen nicht bestehen kann. — Die Aenderung des Wachstums kann zunächst einmal eine Geschwindigkeitsänderung sein. Wenn dann eine entsprechende Aenderung in der Wachstumsdauer gleichzeitig eintritt, wird die normale Gestalt nur früher oder später als gewöhnlich erreicht werden; wenn aber diese kompensierende Veränderung der Wachstumsdauer fehlt, dann wird das Organ andere Proportionen erhalten, es wird länger oder kürzer, dicker oder dünner, breiter oder schmaler werden als gewöhnlich. Damit ist dann eine Formveränderung, ein morphogener Erfolg erzielt. — Manchmal treten solche Veränderungen in allen Dimensionen an allen Organen gleichmäßig auf; dann ergibt sich eine harmonisch verkleinerte oder vergrößerte Pflanze; viel häufiger tritt aber der Fall ein, daß die einzelnen Organe entweder direkt oder nur durch korrelative Beeinflussung verschieden auf den gleichen Reiz reagieren, und daß dann im einen etwa eine Vergrößerung, im anderen eine Verkleinerung eintritt. Ein sehr bekanntes Beispiel für diese Erscheinung liefert das durch Verdunkelungsreiz bewirkte Etiolement. Durch dauernde Verdunkelung wird oft das Längenwachstum der Stengel gefördert, das der Blätter gehemmt. Sehr auffallend werden solche Wachstumsänderungen, wenn auch die einzelnen Teile eines Organs nicht mehr gleich reagieren. So kann z. B. ein lokales Dickenwachstum an einer Partie eines Stengels oder einer Wurzel zu Knollenbildung führen; so kann endlich ein ungleiches Verhalten verschiedener Flanken beim Längenwachstum zu Krümmungen, beim Dickenwachstum zu einseitiger Verdickung führen. Da mit der Einkrümmung eines Organs starke Ortsveränderungen, zum mindesten des freien Endes, verbunden zu sein pflegen, so werden Krümmungen gewöhnlich als „Bewegungserscheinungen" betrachtet, doch könnten sie mit gleichem Recht auch unter den morphogenen Erfolgen behandelt werden, da ja die einseitigen Verdickungen stets unter den Gestaltsveränderungen untergebracht werden und als „Trophien" bezeichnet werden. Im Extrem kann die Veränderung durch einen Reiz so weit gehen, daß ein Organ in ein anderes übergeführt wird.

Die genannten, durch Wachstum erzielten und in Gestaltsänderung bestehenden Reizerfolge sind manchmal durch eine ganze Reihe von gleichzeitig einwirkenden Reizen bedingt, manchmal aber kann man auch einen einzelnen Reiz als in erster Linie verantwortlich bezeichnen. Im letzteren Fall spricht man dann, je nachdem Licht, Wärme, Schwerkraft, mechanische oder chemische Einflüsse wirken, von Photo-, Thermo- Geo-, Mechano- und Chemomorphosen.

γ) Ortswechsel, Bewegungserfolge. Die Bewegungserfolge von Reizen sind ganz besonders viel und eingehend studiert worden, auf sie wird auch in diesem Artikel weiterhin allein Rücksicht genommen. Nach der Art der Bewegung können wir folgende Gruppen unterscheiden:

I. Freier Ortswechsel. Der freie Ortswechsel, durch Geißeln bedingtes Schwimmen oder durch ein Kriechen auf dem Substrat bewirkte Vorwärtsbewegung, findet sich vor allem bei niederen Organismen (Flagellaten usw.) und den beweglichen Zuständen (Schwärmsporen, Gameten) der Algen und mancher Pilze sowie endlich bei den Spermatozoiden der Moose, Farne und einiger Gymnospermen. Die Reize beeinflussen die Richtung, in der die Bewegung erfolgt. Es muß eine Empfindlichkeit entweder für ungleiche Verteilung des Reizmittels im Raum oder seine Veränderung in der Zeit bestehen. Man nennt diese Reizbewegungen taktische Bewegungen oder Taxien, je nach dem Reiz also Phototaxis, Thermotaxis usw.

II. Krümmungen der festgewachsenen Pflanzen. Bei der festgewachsenen Pflanze ist das Verlassen der Stelle, wo sie dem Boden ansitzt, ausgeschlossen. Nur im Inneren ihrer Zellen kann das Protoplasma Bewegungen ausführen, die unter den Taxien mitbehandelt werden müssen. Im übrigen kann diese Pflanze aber durch Krümmungen aller Art die einzelnen Organe in andere Lagen bringen. Diese Krümmungen aber beruhen auf ungleicher Ausdehnung verschiedener Flanken des Organs, die entweder durch den Turgordruck oder durch Wachstum zustande kommen. Im ersteren Fall spricht man von Variationsbewegungen, im zweiten von Wachstumsbewegungen (Nutationsbewegungen). Im folgenden sind diese Reizerscheinungen in zwei Gruppen gebracht. In der ersten werden die tropistischen Bewegungen behandelt, in der anderen werden die Nastieen besprochen. Tropistische Bewegungen sind da-

durch charakterisiert, daß die Krümmungsrichtung von der Reizrichtung abhängt, und daß das Organ in der Ruhelage einen bestimmten Winkel mit der Reizrichtung bildet; bei orthotropen Organen ist dieser Winkel 0 oder 180°, d. h. sie stellen sich in die Reizrichtung ein und man nennt sie positive, wenn ihre Spitze dem Reizzentrum zugewendet, negative, wenn es abgewendet ist; bei den plagiotropen Organen ist der Winkel ein spitzer, rechter oder stumpfer.

Bei den nastischen Bewegungen wird die Krümmungsrichtung lediglich von der Beschaffenheit des Organs bestimmt. Dieses muß physiologisch dorsiventral sein; der Reiz kann dabei ein gerichteter oder ein diffuser sein.

3. Vergleich der Reizerscheinungen mit anderen Auslösungen. Wie einleitend bemerkt, sind Reizerscheinungen außerordentlich verbreitet im Pflanzenreich und speziell unter den Bewegungsvorgängen erfolgt zweifellos die überwältigende Mehrzahl stets nur auf Reize. Sicher keine Reizerfolge liegen nur bei den Stoffbewegungen vor, die durch Diffusion, also durch Konzentrationsunterschiede bedingt sind, andererseits bei Kohäsions- und Schrumpfungsbewegungen, die unabhängig vom lebenden Plasma sich vollziehen. — In einigen wenigen Fällen von Bewegungen spielt zwar eine Auslösung eine Rolle, ohne daß wir es indes mit einer wahren Reizerscheinung zu tun haben. Bei den Schleuderbewegungen mancher Früchte, z. B. der Kapsel von Impatiens, erfolgt das Zerreißen von Gewebsschichten durch eine Vermehrung des Druckes in einer bestimmten Schwellschicht. Hat dieser Druck eine gewisse Höhe erreicht, so tritt das Platzen der Frucht ohne jede weitere Einwirkung von außen ein, und dabei werden die Samen ausgeworfen; es kann aber, ehe diese spontane Ausschleuderung der Samen erfolgt, auch zu einer induzierten Ausschleuderung kommen, wenn die reife Frucht berührt wird. Aller Wahrscheinlichkeit nach hat nun diese Berührung weiter keinen Erfolg, als daß sie die schon bestehende Spannung lokal noch so weit vermehrt, daß eben ein Reißen eintreten muß. Das wäre also eine rein mechanische Wirkung der Berührung, die nicht als Reizwirkung gedeutet werden kann, weil eben hier das lebende Protoplasma vermutlich durchaus nicht mitspielt, was ja bei einer echten Reizbewegung unbedingt der Fall sein muß. Das wird klar werden, wenn wir die Schleuderbewegungen in der Blüte von Catasetum mit der von Impatiens vergleichen. Bei Catasetum ist ein sogenannter Stipes (Fig. 1 st), der die Klebscheibe K mit den Pollinien p verbindet, in starker Spannung. Vermehrt man diese Spannung, indem man den Stipes berührt, so löst er sich vom unterliegenden Gewebe ab, streckt sich gerade und fliegt dabei nach vorn, wobei er zugleich die Klebscheibe und das Pollinium mitnimmt. Soweit wäre alles im wesentlichen wie bei Impatiens. Nun sitzen aber in der Nähe des Stipes in der Blüte zwei lange hornartige Fortsätze, die man Antennen nennt (Fig. 1, ant.). Wird eine

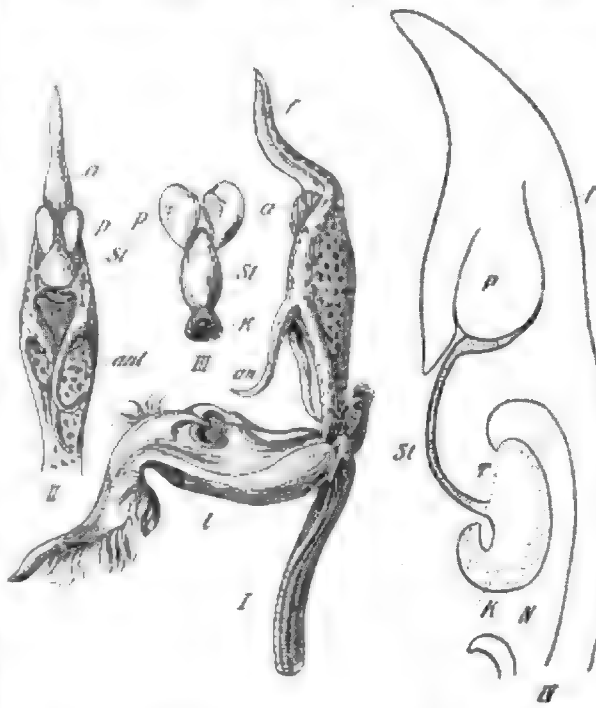


Fig. 1. Catasetum saccatum. I Blüte nach Entfernung von 5 Perigonblättern. II Säulchen von vorn. III Pollinium und Klebscheibe. I bis III nach Darwin. IV Längsschnitt durch ein Catasetumsäulchen nach der Natur. a Anthere, ant Antenne, f Filament, K Klebscheibe, St Stiel, p Pollinium, T Trennungszone der Klebscheibe vom Rostellum, N Narbenhöhle, l Labellum.

dieser Antennen an der Spitze mit einem feinen Pinsel unter Vermeidung jeder Erschütterung gerieben, so erfolgt ebenfalls das Abschleudern des Stipes. Es ist klar, daß es sich diesesmal nicht um mechanische Einwirkung auf die Stipesspannung handeln kann, sondern daß hier lebende Zellen der Antenne gereizt werden und daß sich der Reiz in ihnen bis zum Stipes fortpflanzt. Die Vorgänge in diesen Zellen sind freilich noch ganz unbekannt, ebenso die Vorgänge, die zur Ablösung des Stipes führen.

In ähnlicher Weise wie das Aufspringen der Kapseln von Impatiens erfolgt auch in anderen Fällen eine Abgliederung von Blatt- oder Stammorganen in einer bestimmten Trennungsschicht. Man hat wohl allgemein angenommen, daß die Spaltung in dieser Trennungsschicht und demzufolge die Ablösung des betreffenden Organs nichts mit Reizvorgängen zu tun habe. Nun hat aber neuerdings Fitting (Jahrb. f. wiss. Bot. **49**, 1911) gezeigt, daß das Abfallen der Kronblätter mancher Blüten ein ganz typischer Reizvorgang ist, der für gewöhnlich freilich rein autonom sein

kann, aber experimentell auch — vorzeitig — durch Temperatureinflüsse und Chemikalien ausgelöst werden kann. Bei diesem vorzeitigen Abfallen spielt, wie ganz einwandfrei festgestellt wurde, das Protoplasma eine sehr wesentliche Rolle, und es treten Erscheinungen auf, wie sie weiterhin auch bei den anderen Reizbewegungen besprochen werden (Starrezustände, Summation unterschwelliger Reize). Wahrscheinlich wird eine darauf gerichtete Untersuchung zeigen, daß auch die Schleuderbewegungen der Früchte in ähnlicher Weise als Reizbewegungen auftreten können. Man kann die in einer Zerteilung des Organismus bestehenden Reizreaktionen mit Fitting als Chorismen bezeichnen. Sie wären den im speziellen Teil dieses Artikels allein behandelten Taxien, Tropismen, Nastien an die Seite zu stellen.

4. **Vergleich der reizbaren Pflanze mit einem Mechanismus.** Alle im folgenden zu besprechenden Bewegungen, die Taxien, Tropismen und Nastien, sind nun echte Reizerscheinungen.

Das Wesen des Reizprozesses, die nur auslösende Bedeutung des Reizmittels, kann man sich am besten durch Betrachtung von Mechanismen klarmachen. Man kann Maschinen konstruieren oder sich ausdenken, bei denen Licht, Wärme, Schwerkraft... bei homogener oder einseitiger Einwirkung Veranlassung dafür werden, daß diese Apparate in lokomotorische Bewegung geraten oder eine Krümmungs- oder Richtungsbewegung ausführen. Die auslösende Kraft hat dann nichts anderes zu leisten, als etwa einen Taster zu schließen oder ein Ventil zu öffnen usw., je nachdem der Apparat mit Elektrizität oder mit Dampfkraft betrieben wird. Solche Konstruktionen sind zweifellos sehr geeignet, um sich klarzumachen, daß ein und dieselbe Auslösung je nach der Konstruktion des Mechanismus die allerverschiedensten Enderfolge haben kann, und daß zweitens in energetischer Hinsicht keine bestimmte Beziehung zwischen auslösender Kraft und Erfolg bestehen muß. Die auslösende Kraft kann also der Leistung äquivalent sein, oder sie kann viel größer oder kleiner sein als diese. Es kann ja z. B. die Maschine so eingerichtet sein, daß jeder Schluß des Tasters sofort die volle maximale Leistung des Apparates auslöst und dabei kann je nach der Konstruktion des Apparates ein kleiner oder ein großer Druck auf den Taster erforderlich sein. Andererseits kann man auch den Taster so konstruieren, daß er mit wachsendem Druck immer mehr Strom zur Wirkung bringt, und daß dementsprechend die Leistung annähernd proportional der auslösenden Kraft zunimmt. Tatsächlich finden wir bei den Pflanzen beide Möglichkeiten realisiert: bei Mimosa bewirkt jeder Stoß, der überhaupt wirksam ist, gleich die volle maximale Blattsenkung, während die Einkrümmung einer Ranke bis zu einem gewissen Grade der Reizung proportional ist.

Man darf aber bei mechanischen Modellen für Reizbewegungen zweierlei nicht übersehen, nämlich: 1. daß es sich in der Pflanze nicht um Mechanismen im eigentlichen Sinne des Wortes handelt, sondern um „Chemismen", d. h. daß nicht durch „Hebel und Schrauben" eine Uebertragung und Richtungsänderung von Kräften zustande kommt, sondern daß das ganze Getriebe vorwiegend in aufeinanderfolgenden chemischen Reaktionen besteht; 2. daß die Vorgänge in der Pflanze ungleich viel komplizierter sind als in solchen Modellen.

5. **Komplikation des Reizprozesses.** Die Komplikation des Reizprozesses wird besonders deutlich, wenn es gelingt, mehrere Teilprozesse in ihm zu unterscheiden, oder wenn es sich zeigt, daß ein und derselbe Reiz nicht nur eine Bewegung in einem bestimmten Sinn erzeugt, sondern daß er auch zur entgegengesetzten Bewegung führt, mag das nun in der Weise geschehen, daß zunächst die eine Bewegung und dann eine Rückregulation stattfindet, oder daß der Reiz unter bestimmten Umständen sofort zur entgegengesetzten Bewegung führt, als man sonst zu sehen gewohnt ist.

5a) Gliederung in Reizaufnahme, Leitung und Reaktion. Am Tentakel von Drosera wird durch eine gewisse Art von Berührung eine Einkrümmung erzielt. Die Berührung muß am Köpfchen stattfinden, während die Bewegung im Tentakelstiel ausgeführt wird. Es ist in diesem Fall klar, daß der Reizprozeß in den Vorgang der Reizaufnahme („Perzeption") und den Vorgang der Reaktion getrennt sein muß. Und da beide Prozesse an verschiedenen Orten stattfinden, so muß zwischen beiden eine Verbindung durch Reizleitung hergestellt werden. Aehnliches wurde schon oben bei Besprechung von Catasetum erwähnt und im folgenden wird zu zeigen sein, daß mindestens zwei Prozesse, nämlich Reizaufnahme und Reizreaktion, überall unterschieden werden müssen, auch dann, wenn die Reizaufnahme nicht räumlich getrennt von der Aktionszone erfolgt oder wenn die Trennung zwischen Aufnahme- und Bewegungsorgan wenigstens nicht so scharf wie bei Drosera ist. Wir haben allen Grund anzunehmen, daß jeder dieser Prozesse noch aus Teilvorgängen besteht, so daß die ganze Reizreaktion aus einer Kette von mit Notwendigkeit aufeinander folgenden Einzelreaktionen besteht („Reizkette").

5b) Regulationen. Die Bewegung, die wir als Endreaktion auf den Reiz beobachten, kann entweder das Organ in eine neue Ruhelage überführen, also eine dauernde sein, oder aber sie ist eine vorübergehende,

d. h. es folgt ihr früher oder später ohne neuen Reiz eine rückläufige Bewegung (Rückregulation, Gegenreaktion). Vielfach tritt aber auch bei den Bewegungen, die zu einer neuen Gleichgewichtslage führen, eine Gegenreaktion auf (Autotopismus), die entweder bei Fortbestehen des Reizes nur zu einer Abschwächung der erzielten Bewegung führt oder nach Aufhebung des Reizes zu einer vollkommenen Aufhebung der ersten Bewegung. Es scheint, daß solche Gegenreaktionen außerordentlich häufig sind und oft schon früh eintreten; im Extrem, noch ehe die eigentliche Bewegung wirklich stattgefunden hat. Vielleicht sind solche Gegenreaktionen die Ursache davon, daß bei unbegrenzter Reizung der Reizerfolg immer ein begrenzter bleibt.

5c) Stimmung. Möglicherweise besteht eine Beziehung zwischen den eben besprochenen Gegenreaktionen und den jetzt noch zu behandelnden Reaktionsänderungen, die ebenfalls häufig bei Reizbewegungen zur Beobachtung kommen. Reaktionsänderungen können zunächst einmal durch die lange Dauer oder die hohe Intensität des Reizmittels herbeigeführt werden. So sehen wir z. B. einen Sproß bei schwacher phototropischer Reizung sich nach der Lichtquelle hinwenden, während derselbe Sproß nach Einwirkung einer großen Lichtmenge sich vom Licht abwendet. Man muß also hier dem Licht nicht nur eine Rolle als phototropisches Reizmittel zusprechen, sondern muß auch sagen, daß es imstande ist, die Stimmung der Pflanze zu verändern, denn unter Stimmung versteht man eben einen gewissen inneren Zustand, der sich in der Reaktionsweise äußert. Eine Stimmungsänderung kann aber auch durch andere äußere Reize oder durch innere Dispositionen, z. B. durch das Alter, durch Korrelationen mit anderen Organen herbeigeführt werden.

6. **Reizerscheinungen der Pflanzen verglichen mit denen der Tiere.** In den letzten Jahren sind die Reizerscheinungen der Pflanzen mehrfach mit denen der Tiere verglichen worden. Einerseits ist das in durchaus ernsthafter wissenschaftlicher Weise geschehen, wobei sich zeigte, daß eine Fülle von Analogien zwischen beiden bestehen. Auf der anderen Seite haben aber auch popularisierende Schriftsteller in sensationeller Weise diese Fragen behandelt und haben versucht, dem Publikum glauben zu machen, daß in bezug auf die Reizbarkeit ein Unterschied zwischen der Pflanze und dem höheren Tier überhaupt nicht existiere, daß also auch der Pflanze eine ausgesprochene Psyche zukomme. Die Beweise für diese Psyche sind aber äußerst dürftig und beschränken sich schließlich auf einige Fälle von zweckmäßiger Reaktion, denen man leicht auch gegenteilige Beispiele an die Seite stellen kann. Namentlich bei den raschen Bewegungen der niederen Organismen kann leicht der „Eindruck" des „vernünftigen" Handelns erweckt werden. Wollte man aus diesem Grunde den Pflanzen eine wenn auch noch so primitive Psyche zuschreiben, so wäre damit für die physiologische Erklärung der Bewegungen nichts gewonnen. Wenn der Physiologe eine Identität der pflanzlichen und tierischen Reizbewegungen annehmen will — die insofern viel für sich hat, als ja zweifellos keine Grenze zwischen den beiden Reichen besteht —, so kann er höchstens die eine Frage diskutieren, ob den Pflanzen „Reflexbewegungen" zukommen. Hält man daran fest, daß die typische Reflexbewegung, wie schon ihr Name sagt, darin besteht, daß ein Reiz irgendwo aufgenommen wird, dann durch einen Nerven zu einer Ganglienzelle geleitet und von dieser verändert und zum Organ der Bewegung geleitet wird, so muß man der Pflanze schon aus dem Grunde Reflexbewegungen absprechen, weil sie keine Nerven hat. Auf einen unserer Meinung nach richtigeren Standpunkt stellt man sich aber, wenn man sagt, daß es für die physiologische Betrachtung doch ganz gleichgültig sein muß, ob eine Reizleitung in besonders ausgebildeten Zellen (Nerven) verläuft oder in einem nicht spezialisierten Protoplasma. Dann bleibt indes immer noch die Frage, ob man der Pflanze ein Zentralorgan zuschreiben darf, das der Ganglienzelle entsprechend funktioniert und die zugeleitete Erregung umsetzt. Da man manche reizbare Organe nicht nur der Quere, sondern auch der Länge nach in eine Anzahl von Stücken zerlegen kann, die genau so reagieren wie zuvor das intakte Organ, so scheint ein physiologisches Zentralorgan in der Pflanze nicht zu bestehen, oder es müßte sich nach jedem solchen Eingriff rasch wieder bilden. — Eine exakte Antwort auf die gestellte Frage ist also zurzeit nicht zu geben.

Literatur. ***W. Pfeffer***, *Die Reizbarkeit der Pflanzen (Verhandlungen der Gesellschaft deutscher Naturforscher und Aerzte. 1893).* — ***Derselbe***, *Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Leipzig 1897 bis 1904.*

L. Jost.

II. Taxien.

1. Taxien bei freibeweglichen Organismen. a) Chemotaxis: α) Bakterien. β) Flagellaten. γ) Saprolegnien. δ) Chytridiaceen. ε) Schwärmsporen der Myxomyceten. ζ) Plasmodien der Myxomyceten. η) Farnspermatozoen. ϑ) Andere Spermatozoen. ι) Perzeption. b) Osmotaxis. Hydrotaxis. c) Phototaxis. d) Thermotaxis.

e) Galvanotaxis. f) Geotaxis. g) Thigmotaxis. h) Rheotaxis. 2. Taxien der Zellorgane. a) Chloroplasten. b) Zellkern. c) Protoplasma.

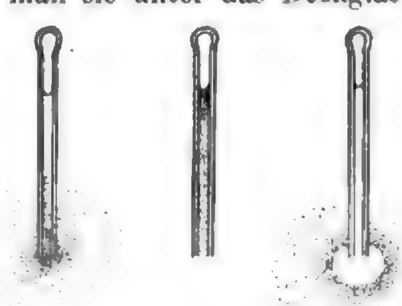
Taktische Bewegungen finden sich einerseits bei freibeweglichen Organismen, andererseits bei den in der Zellhaut eingeschlossenen Protoplasten sowie deren Organen, Zellkern und Chromatophoren.

1. **Taxien bei freibeweglichen Organismen.** Je nach dem Reizmittel unterscheiden wir hier Chemotaxis, Osmotaxis, Thigmotaxis, Geotaxis, Phototaxis, Thermotaxis und Galvanotaxis u. a. Von diesen allen ist zweifellos die Chemotaxis am besten studiert.

1a) Chemotaxis. Eine chemotaktische Reizung kann nur dann erfolgen, wenn erstens ein chemotaktisch sensibler Organismus, zweitens eine chemotaktisch wirksame Substanz gegeben ist, und wenn drittens diese Substanz in der Umgebung des Organismus ungleich verteilt ist. Da die meisten der in Betracht kommenden Organismen im Wasser leben, so sind die wirksamen Substanzen in der Regel im Wasser gelöste und durch Diffusion sich in ihm verbreitende Stoffe. Die chemotaktischen Organismen streben dann entweder dem Diffusionszentrum zu, was als positive Reaktion bezeichnet wird, oder sie fliehen es (negative Reaktion); sehr häufig sammeln sie sich in einer für sie optimalen Konzentrationszone des Reizmittels an. — Nicht jede durch ungleiche Verteilung von Stoffen bedingte Reizbewegung darf man als eine chemotaktische bezeichnen. Wenn es sich zeigen läßt, daß die Bewegungen lediglich durch die Konzentration der Stoffe bedingt sind, also nur von der Zahl, nicht von der chemischen Beschaffenheit der Moleküle und Ionen abhängen, dann spricht man von Osmotaxis (S. 226). Chemotaxis liegt nur dann vor, wenn auch die chemische Konstitution des Reizmittels eine Rolle spielt, ohne daß deshalb seine Konzentration für den Erfolg gleichgültig wäre. Die Osmotaxis wird also durch die physikalischen, die Chemotaxis durch die chemischen Wirkungen der gelösten Stoffe bedingt.

Nach der ökologischen Bedeutung der Reizbarkeit können wir zwei Gruppen von chemotaktischen Organismen unterscheiden: Bei den Bakterien, Flagellaten und anderen beweglichen vegetativen Zuständen der Algen ermöglicht die Chemotaxis in der Regel das Aufsuchen passender Nährstoffe, während bei den Spermatozoen die Auffindung der Eizelle und damit die Befruchtung durch die chemotaktische Reizbarkeit gesichert wird. Demnach handelt es sich in den chemotaktischen Bewegungen in der Regel um zweckmäßige, d. h. für den Organismus nützliche Reaktionen. Wir werden aber sehen, daß manchmal auch chemotaktische Bewegungen ausgeführt werden, die nicht nützlich oder die gar schädlich sind: sie erfolgen freilich in der Regel auf Substanzen hin, die der Organismus in der Natur kaum antreffen dürfte.

α) Chemotaxis der Bakterien. Zu ihrem Nachweis ist zunächst ein empfindlicher Bakterienstamm nötig. Es hat sich gezeigt, daß bei Erhaltung aller anderen Eigenschaften die chemotaktische Sensibilität der Bakterien ungemein rasch schwinden kann, manchmal so, daß wir die Ursachen dieser Erscheinung erkennen können, manchmal aber aus ganz unbekannten Gründen. Empfindliche Bakterien werden zunächst auf den Objektträger in Wasser oder, wenn das nötig ist, in verdünnte Nährlösung gebracht. Handelt es sich dann um die Untersuchung der Einwirkung des Sauerstoffs, so wird dieser nach Bedeckung des Präparates mit einem Deckglase entweder vom Rand her in das Präparat hereindiffundieren, oder er wird von einigen zufällig oder absichtlich unter dem Deckglas angebrachten Luftblasen aus in die Flüssigkeit eindringen. Feste, in Wasser gelöste Stoffe aber wird man nach Pfeffers Vorgang am besten in enge Kapillaren füllen und einseitig dem Präparat zuführen (Fig. 1). Im allgemeinen empfiehlt es sich, diese Kapillaren nicht zu eng zu nehmen; Pfeffer benutzte solche von 0,12 bis 0,03 mm Durchmesser. Sie werden in einer Länge von etwa 1 cm verwendet, am einen Ende zugeschmolzen, unter der Luftpumpe mit dem Chemotaktikum gefüllt und nach oberflächlicher Abspülung mit Wasser zum Versuch benutzt, indem man sie unter das Deckglas oder in ein offenes Präparat einschiebt. Ist die Lösung chemotaktisch wirksam, so bemerkt man meist schon in außerordentlich kurzer Zeit (in einigen Minuten) eine Ansammlung



A B C

Fig. 1. Chemotaxis von Bakterien. Nach Pfeffer, Physiologie. In der Kapillare A ist 1 % Fleischextrakt; die Bakterien sammeln sich in wenigen Minuten an der Oeffnung. B enthält eine Luftblase, die gleichfalls zu + chemotaktischer Reaktion führt. C enthält angesäuerten Fleischextrakt; die repulsive Wirkung der Säure bewirkt eine Bakterienanhäufung in einem gewissen Abstand von der Oeffnung der Kapillare.

der Bakterien in der Kapillare oder vor ihrem Mund. Es sieht zunächst so aus, als ob die Bakterien von der Lösung angezogen würden. Beobachtet man aber das Verhalten langsam beweglicher und großer Bakterien (z. B. Bacillus Solmsii) genauer, so bemerkt man, daß von einer „Anziehung" nicht die Rede ist. Die Bakterien bewegen sich im großen und ganzen geradlinig ohne jede Beziehung zur Kapillare. Auch zeigen sie, wenn sie zufällig in die Nähe des Kapillarenmundes gelangen, zunächst keinerlei Beeinflussung durch den Kapillareninhalt; sie gehen ohne jede Richtungsänderung vorüber. In einiger Entfernung vom Kapillarenmund aber machen sie plötzlich halt und schwimmen dann rückwärts („Schreckbewegung") d. h. mit dem bisherigen Hinterende voran. Wiederum gehen sie unbeeinflußt an der Kapillarenöffnung vorüber, machen ungefähr in der gleichen Entfernung von ihr wie das erste Mal abermals halt und schwimmen dann wieder vorwärts. Sie sind also in einer bestimmten Zone, deren Zentrum die Oeffnung der Kapillare darstellt, gefangen („physiologische Falle"). Das Eindringen in diese Zone, das kann nicht scharf genug hervorgehoben werden, erfolgt zweifellos ganz zufällig und die Reizreaktion, die im Zurückschwimmen besteht, wird nur beim Uebergang in niedrigere Konzentrationen ausgelöst; der Uebergang in konzentriertere Zonen wirkt wenigstens in den Versuchen, die wir jetzt im Auge haben, nicht als Reiz. Aller Wahrscheinlichkeit nach besteht der Reizanlaß für das Zurückprallen nicht etwa darin, daß das eine Ende des Bakteriums in eine niedrigere Konzentration gelangt als das andere Ende, sondern darin, daß der ganze Bakterienleib von niedrigerer Konzentration getroffen wird als kurze Zeit zuvor. Mit anderen Worten, es handelt sich nicht um örtliche, sondern — wie bei den Nastien — um zeitliche Konzentrationsdifferenzen. Dann müßten aber auch homogene Lösungen den Reiz hervorbringen können; ein Bakterium müßte rückwärtsschwimmen, wenn man es in eine homogene, aber verdünntere Lösung des gleichen Stoffes bringt, in dem es bisher gelebt hat. Bei Infusorien hat Jennings einen derartigen Versuch mit bestem Erfolg ausgeführt; bei Bakterien aber stellen sich ihm (schon weil man die beiden Enden einer Zelle nicht unterscheiden kann) ganz unüberwindliche Schwierigkeiten entgegen.

Die geschilderte Reaktionsweise nennt man „phobotaktisch" und man bringt sie in Gegensatz zur sogenannten „topotaktischen", die dadurch charakterisiert sein soll, daß der Organismus, sowie er in den Bereich der diffundierenden Substanz gelangt, eine Drehung seines Körpers ausführt, die ihn in die Richtung des Diffusionsgefälles bringt und bei weiterer Vorwärtsbewegung der Kapillare nähern muß. Aber nicht die Drehung des Körpers, sondern die Einstellung in die Diffusionsrichtung wäre das Charakteristikum der topischen Empfindlichkeit, denn Drehungen können auch zweifellos phobische Organismen ausführen, und sie werden wohl von allen diesen tatsächlich ausgeführt, wenn es sich um monopolare Wesen handelt. Für ein Spirillum, das nur am einen Ende Geißeln führt, hat Jennings die phobische Reaktion in folgender Weise beschrieben: auch hier erfolgt zunächst ein Zurückprallen an derselben Stelle, an der ein bipolar begeißeltes Bakterium zurückschwimmt; aber diese Bewegung wird nur kurze Zeit fortgesetzt, dann erfolgt nach einer größeren oder kleineren Wendung der Achse erneute Vorwärtsbewegung, deren Richtung eine ganz zufällige ist. Bringt sie das Spirillum in ungünstigere Zonen, so erfolgt alsbald eine neue phobische Reaktion, die aber unterbleibt, wenn zufällig der Weg zur Kapillare gefunden wird. Ein sehr wesentlicher Unterschied zwischen der phobischen und der topischen Reaktionsweise liegt darin, daß im ersten Fall das Ziel nur zufällig gefunden werden kann, während es im anderen aktiv aufgesucht wird. Was der Reizanlaß bei topischer Reizung sein mag, ist schwer vorstellbar, doch hier nicht zu diskutieren, weil diese Reaktionsweise bei Bakterien zweifellos nicht vorkommt.

Die bisher ins Auge gefaßte phobische Reaktion nennt man eine positive, weil sie zu einer Ansammlung in der Nähe des Reizzentrums führt. Es gibt aber auch negative phobische Reaktionen, bei denen der Organismus von dem chemotaktisch wirksamen Stoff sich zurückzieht und sich dementsprechend in einiger Entfernung von der Kapillare hält. Sie sind in vielen Fällen einfach durch eine zu hohe Konzentration des Reizmittels bedingt; es kann dann also ein und derselbe Stoff je nach seiner Konzentration positiv oder negativ wirken. Es gibt aber auch Stoffe, die, wenn sie überhaupt wirken, stets nur die negative Reaktion herbeiführen. Bei negativer Chemotaxis findet ebenfalls ein Zurückprallen statt, diesmal aber bei einer Zunahme der Konzentration.

Unter den Reizstoffen nennen wir zunächst den Sauerstoff, der auf viele, aber durchaus nicht auf alle beweglichen Bakterien chemotaktisch wirkt. Dieser Chemotaxis hat man einen besonderen Namen gegeben: Aërotaxis. Sehr häufig wird eine bestimmte Konzentration des Sauerstoffs aufgesucht, eine zu hohe ebenso geflohen wie eine zu niedrige. Im mikroskopischen Präparat, das vom Deckglas bedeckt ist, tritt

also eine Ansammlung in einer Zone auf, die bei stark O-bedürftigen Formen dicht am Rande liegt, bei O-feindlichen ganz in der Mitte. Viele Bakterien suchen sich aber, obwohl ihnen Sauerstoff unentbehrlich ist, doch mittlere Spannungen auf; das gilt z. B. für manche Schwefelbakterien wie Beggiatoa. — Daß man auf Sauerstoff chemotaktisch reagierende Bakterien zum Nachweise der CO_2-Assimilation der Chloroplasten benutzen kann, ist an anderer Stelle ausgeführt (vgl. den Artikel „Photosynthese"). — Reaktionen auf andere Gase sind bei den Bakterien kaum bekannt. Ein rotes Schwefelbakterium sucht chemotaktisch Schwefelwasserstoff auf, den es ja notwendig braucht. Wieweit diese Sensibilität unter den Schwefelbakterien verbreitet ist, läßt sich nicht sagen.

Die Einwirkung fester, gelöster Körper auf Fäulnisbakterien (Bacterium termo, Spirillum undula und andere Spirillen, sowie Bacillus subtilis) hat Pfeffer studiert. Er fand, daß die empfindlichsten Formen (z. B. Bacillus termo) auf eine große Menge von Stoffen reagieren. Von anorganischen Substanzen auf alle geprüften neutralen Salze der Alkalien und Erdalkalien, von organischen auf Traubenzucker, Milchzucker, Dextrin, Mannit, Harnstoff, Asparagin, Kreatin, Taurin, Sarcin, Carnin, Pepton, neutralen Fleischextrakt, salicylsaures Natrium, salzsaures Morphium u. a. Die beiden letztgenannten Stoffe sind ausgesprochene Gifte für die Bakterien, die somit nach der chemotaktischen Anlockung zugrunde gehen. Aehnliches gilt auch für Aether, der nach den Erfahrungen Rotherts gewisse Bakterien wenigstens in schwachen Dosen anlockt, während er freilich in höheren Konzentrationen abstoßend wirkt. Immer repulsiv wirkt Alkohol, sowie freie Säuren (Fig. 1, C) und freie Alkalien. Nicht repulsiv wirken von schweren Giften Sublimat und Strychninnitrat. Auf der anderen Seite gibt es auch gute Nährstoffe wie das Glycerin, die dennoch keinerlei chemotaktische Wirkung ergeben. Trotz solcher einzelner Ausnahmen wird man im allgemeinen, wie schon eingangs erwähnt, die Chemotaxis als eine nützliche Eigenschaft beweglicher Organismen betrachten dürfen.

Auffallenderweise hat neuerdings Lidfors (Ber. Bot. Ges. 30, 262) für ein farbloses Thiospirillum chemotaktische Anlockung nicht nur für H_2S und andere Schwefelverbindungen, sondern auch für eine Menge organischer Verbindungen (Alkohole, Ketone, Aldehyde, Aether, Chloroform, Säuren, viele aromatische Substanzen) festgestellt. Die Bedeutung dieser Reizbarkeit ist noch ganz unklar.

Bei Bacterium termo, für das die eben genannten Chemotaktika in erster Linie gelten, kommt es nur selten vor, daß diese Stoffe in höherer Konzentration eine repulsive Wirkung aufweisen, so z. B. bei Monokaliumphosphat und Kaliumkarbonat. Dagegen tritt eine solche repulsive Wirkung bei Spirillum undula fast bei allen Stoffen hervor.

Die neuerdings von Kniep studierten Fäulnisbakterien, z. B. der Bacillus Z zeigten eine ganz andere chemotaktische Reizbarkeit als die Pfefferschen Bakterien. Sie reagierten positiv auf Fleischextrakt, Asparagin, Ammonium- und Kalziumionen, sie reagierten gar nicht auf Dextrin, Harnstoff, sowie auf die Ionen des Na, K, Ba, Mg.

Reizschwelle. Bei den Bakterien, die auf zahlreiche Substanzen chemotaktisch reagieren, bemerkt man eine verschiedene Empfindlichkeit für die einzelnen Stoffe. Diese findet ihren Ausdruck darin, daß von manchen Stoffen eine recht geringe Konzentration schon chemotaktisch wirkt, während von anderen hohe Konzentrationen nötig sind. Die minimale, eben noch Ansammlung bewirkende Konzentration wird „Reizschwelle" genannt. Für Bacterium termo hat Pfeffer folgende Reizschwellen bestimmt:

Pepton, Fleischextrakt, Dextrin .	0,001 %
Trikaliumphosphat	0,0018 %
Asparagin	0,01 %
Kaliumchlorat, Harnstoff	0,1 %
Kreatin	1,0 %
Traubenzucker	> 1,0 %

Um einen besseren Einblick in die Verschiedenheit der Empfindlichkeit zu gewinnen, müßten diese prozentischen Angaben in molare umgerechnet werden. Wir sehen davon ab, weil ohnedies nach den Erfahrungen von Kusano an Myxomycetenschwärmern, über die später eingehend zu berichten sein wird, die mitgeteilten Schwellenwerte insgesamt zu hoch sein dürften. Als Kusano mit der gleichen Kapillarenmethode, mit der diese Werte von Pfeffer erhalten waren, bei den Myxomyceten Schwellenwerte für freie Säuren bestimmte, erhielt er z. B. durch Salzsäure erst bei $^1/_{200}$ Mol eine chemotaktische Wirkung, während $^1/_{800}$ Mol Salzsäure die Sporen schon schwer schädigt. Es wäre aber schwer verständlich, daß die Reizschwelle für positive Chemotaxis erst bei Konzentrationen liegen sollte, die für den Organismus verderblich sind. Kusano verwirft die Pfeffersche Methode der Schwellenbestimmung aus diesen und anderen Gründen vollkommen und ersetzt sie durch eine neue. Er fängt die chemotaktischen Organismen in einer relativ weiten Kapillare ein (Durchmesser 0,3 bis 0,4 mm), verschließt die Kapillare einseitig und bringt sie dann in verschieden starke Lösungen des

Reizmittels. Es läßt sich dann eine Konzentration finden, bei der die dem Kapillarenmund nächsten Schwärmer eine positive Reaktion ergeben; diese Lösung wird als der Schwellenwert betrachtet. In dieser Weise bestimmte Werte würden ganz gewiß auch bei Bakterien sehr viel niedrigere Werte geben, als die angeführten.

Noch von einem anderen Gesichtspunkt aus sind die mitgeteilten Schwellenwerte nicht befriedigend und bedürfen der Nachuntersuchung. Die meisten Chemotaktika sind Elektrolyte, deren Lösungen in solcher Verdünnung wohl völlig ionisiert sind. Da müßte der Anteil der einzelnen Ionen und eventuell auch der undissoziierten Moleküle bestimmt werden, um so mehr als nicht selten gefunden wurde, daß ein und dieselbe Substanz gleichzeitig bei einer bestimmten Konzentration attraktiv und repulsiv wirkt. Das muß ebenso auf Ionenwirkung beruhen wie z. B. das Ergebnis Pfeffers, daß 0,001 % Kalium im Trikaliumphosphat die gleiche Wirkung besitzen soll wie 0,1 % Kalium in Kaliumchlorat. In diesem Fall werden also nicht nur die Kalium-, sondern auch die Phosphat- und Chlorionen von Bedeutung sein.

Auch die stets repulsiv wirkenden Stoffe haben einen Schwellenwert. Dieser wurde von Pfeffer in der Weise bestimmt, daß die Anziehung eines positiven Chemotaktikums durch Zusatz eines negativen gerade aufgehoben wurde. So ließ sich zeigen, daß die anlockende Wirkung von 0,191 % KCl durch 0,1 % Zitronensäure oder durch 0,177 Kaliumcarbonat fast überwunden wird. Sehr viel höher liegt die Schwelle für die in niedriger Konzentration positiv wirkenden Stoffe; bei manchen fehlt sie ganz: Bacterium termo schwärmt noch in 20 % KCl, 20 % NaCl und 40 % $CaCl_2$ ein. Natürlich geht es dann zugrunde.

Unterschiedsschwelle. Wenn auch zur Herstellung einer chemotaktischen Ansammlung durchaus eine ungleiche Verteilung des Chemotaktikums, ein Diffusionsgefälle notwendig ist, so darf man doch nicht glauben, daß die homogene Verteilung des Reizstoffes ohne Einfluß auf den Organismus sei. Jede homogene Lösung des Reizmittels setzt nämlich die Empfindlichkeit des Organismus für einseitige Reizung durch das gleiche Agens herab, d. h. sie erhöht die Reizschwelle, und zwar in durchaus gesetzmäßiger Weise. Wird z. B. Bacterium termo, das sich in Wasser befindet, einseitig durch Fleischextrakt gereizt, so liegt, wie wir gesehen haben, die Reizschwelle bei 0,001 %. Wenn aber als Kulturflüssigkeit statt Wasser Fleischextrakt in steigenden Konzentrationen verwendet wird, so muß die Konzentration des chemotaktisch wirkenden Fleischextraktes stets etwa 5 mal so stark sein, wie die der Kulturflüssigkeit.

Es liegt somit die Reizschwelle

in Fleischextrakt	von	0,01	bei	0,05 %
„ „	„	0,1	„	0,5 %
„ „	„	1,0	„	5,0 %

Es muß also der Reizzuwachs, der durch die einseitig wirkende Lösung gegeben wird, stets im gleichen Verhältnis zu der schon bestehenden Reizung stehen. Ganz die gleiche Gesetzmäßigkeit ist auch bei Reizerfolgen tierischer Organismen gefunden worden (Webersches Gesetz), z. B. bei unserer Gewichtswahrnehmung. Ein Gewicht von 1 g muß um $^1/_3$ g, ein Gewicht von 10 g um $^{10}/_3$ g vermehrt werden, damit wir einen Unterschied wahrnehmen. Im Gegensatz zu der einfachen Schwellenbestimmung handelt es sich also hier um die Feststellung einer Unterschiedsschwelle.

Es ist klar, daß das Webersche Gesetz nur eine beschränkte Gültigkeit haben kann; es dürfte weder bei ganz hohen noch bei ganz niedrigen Konzentrationen zutreffen. Trotz dieser Beschränkung hat es aber eine große Bedeutung für das Studium der chemotaktischen Empfindlichkeit gewonnen, weil es gestattet, die Frage zu beantworten, ob die Reaktionsfähigkeit der Bakterien auf so ganz verschiedene Stoffe auf einer einzigen oder auf mehreren Sensibilitäten beruht, mit anderen Worten, ob die Bakterien deshalb von so verschiedenen Stoffen gereizt werden, weil diese nicht unterschieden werden, oder ob sie ein Unterscheidungsvermögen besitzen.

Schon auf Grund von Ueberlegungen hat man verschiedene Sensibilitäten angenommen, z. B. eine andere für die Aërotaxis als für die Chemotaxis im engeren Sinn. Daß aber auch die Chemotaxis auf verschiedenen Sensibilitäten beruhen kann, hat zuerst Rothert für einen Amylobacter gezeigt, der sowohl auf Fleischextrakt wie auf Aether reagiert. Erfolgte die Reaktion deshalb auf diese beiden Stoffe, weil sie der Organismus nicht unterscheiden kann, so müßte die Abstumpfung der Empfindlichkeit, die man durch homogene Lösungen erzielen kann, sich ebenso gut mit Fleischextrakt wie mit Aether erzielen lassen, wenn z. B. mit Fleischextrakt einseitig gereizt wird. Tatsächlich ergab sich aber, daß die Empfindlichkeit für Fleischextrakt durch homogenen Aether in keiner Weise herabgesetzt wird (Kritische Bemerkungen bei Kniep 1906, S. 264). Es müssen also zwei getrennte Sensibilitäten für diese beiden Stoffe vorhanden sein.

In entsprechender Weise hat Kniep gezeigt, daß sein Bazillus Z, der auf Asparagin, Phosphate und Ammonsalze reagiert, drei

getrennte Sensibilitäten für diese Stoffgruppen besitzt, daß aber z. B. seine Reaktion auf NH_4Cl und NH_4NO_3 auf dem gleichen Reizvorgang beruht. Zugleich konnte Kniep zeigen, daß die Sensibilität für Asparagin von der sauren oder alkalischen Reaktion des Nährbodens ganz unabhängig ist, während die Empfindlichkeit für Phosphate durch H-Ionen, die für Ammoniumsalze durch OH-Ionen geweckt wird. Auch diese verschiedene Beeinflußbarkeit der Sensibilitäten spricht für ihre Selbständigkeit. Wie Pringsheim hervorgehoben hat, gibt es noch einen dritten Weg zur Untersuchung der Verschiedenartigkeit der Sensibilitäten. Bei verschiedener Sensibilität dürfen sich Stoffe, die in unterschwelliger Konzentration dargeboten werden, in ihrer Wirkung nicht addieren lassen; dagegen kann ein Stoffgemisch, dessen Komponenten einzeln den Schwellenwert nicht erreichen, reizend wirken, wenn der Organismus diese Komponenten nicht zu unterscheiden vermag. Mit dieser Methode hat Rutten gezeigt, daß die Perzeption beim Geotropismus eine andere ist als beim Phototropismus; auf dem Gebiet der Taxien ist sie noch nicht verwendet worden.

Wenn eben gesagt wurde, daß bestimmte Einwirkungen gewisse Sensibilitäten abstumpfen oder gar ganz auslöschen, so muß auch erwähnt werden, daß Chloroform und Aether — entsprechend ihrer Wirkung auf unser Nervensystem — alle Sensibilitäten vernichten oder temporär hemmen können, bei geeigneter Dosierung aber die Beweglichkeit unverändert lassen.

β) Chemotaxis der Flagellaten. Von farblosen Flagellaten hat Pfeffer namentlich Bodo saltans studiert, daneben Hexamitus, Trepomonas und Polytoma, von grünen Chlamydomonas. Sie zeigen Chemotaxis ungefähr nach den gleichen Substanzen wie die Fäulnisbakterien. Insbesondere reagiert auch Chlamydomonas trotz seines Chlorophylls auf organische Stoffe wie Dextrin, Asparagin und Pepton. Da die Chlamydomonaden keine rein autotrophen Organismen sind, so erscheint dieses Verhalten ökologisch verständlich. Ebenso begreiflich ist es aber auch, daß andere Chlamydomonaden, die autotroph sind, keine Anlockung durch diese Substanzen, wohl aber durch Kohlensäure, Phosphate und Nitrate ergaben (Frank 1904).

γ) Chemotaxis von Saprolegnien-Schwärmsporen. Die Schwärmsporen der Saprolegnien suchen in der Natur vor allem Insekten auf, die ins Wasser gefallen sind; so ist von vornherein wahrscheinlich, daß sie auf Stoffe, die aus solchen herausdiffundieren, chemotaktisch reagieren dürften. Die Prüfung mit der Kapillarenmethode ergab denn auch, daß sie von Fleischextrakt in ausgezeichneter Weise angelockt werden. Vor allem dürften es die im Fleischextrakt enthaltenen Phosphate sein, denen diese Wirkung zukommt; doch reagieren die Schwärmer auch auf freie Phosphorsäure, auf Eiweiß und Eiweißabbauprodukte, einige wenige N-freie organische Säuren und auf Lecithin. Dagegen erwiesen sich Glycerin, Leucin, Traubenzucker und Milchzucker als indifferent (Stange 1890, F. Müller 1911). Bekanntlich encystieren sich die Saprolegnienschwärmer nach einer kürzeren ersten Schwärmperiode für einige Zeit und beginnen dann in anderer Gestalt und mit größerer Bewegungsgeschwindigkeit eine zweite Bewegung. Nur in dieser zweiten Periode sind sie chemotaktisch (Rothert 1901).

Ueber die Reaktionsweise der Saprolegnien sind wir nicht genau unterrichtet. Die große Geschwindigkeit erschwert sehr die Beobachtung. Wird durch Zusatz von Aether die Geschwindigkeit vermindert, so konnte Rothert beobachten, daß Schwärmer, die zufällig in die Diffusionssphäre gelangen, plötzlich einen Augenblick anhalten, dann unter eventueller Drehung ihres Körpers direkt auf das Diffusionszentrum zuschwimmen. Es wird zu untersuchen sein, ob es sich hier um eine phobo- oder topotaktische Reaktion handelt, oder ob gar etwa eine Kombination beider vorliegt.

δ) Chemotaxis von Chytridiaceen-Schwärmsporen. Die Schwärmsporen der Chytridiaceen werden entweder nur von Eiweißkörpern angelockt (Rhizophidium pollinis) oder außerdem noch von den aus Eiweiß entstehenden Aminosäuren und verwandten N-haltigen Substanzen (Rhizophidium Sphaerotheca, Pseudolpidium Saprolegniae). H- und OH-Ionen werden geflohen; dementsprechend wirken freie Säuren und Alkalien nur abstoßend. Die Reaktionsweise soll die topische sein, doch dürfte das noch eingehender zu begründen sein (F. Müller 1911).

ε) Chemotaxis von Myxomyceten-Schwärmsporen. Die Schwärmsporen der Myxomyceten besitzen eine ausgezeichnete chemotaktische Sensibilität für Säuren und Alkalien. Erstere bewirken in schwacher Konzentration positive, in starker negative Reaktion, letztere haben, wenn überhaupt, nur eine negative Reaktion zur Folge. Daß die positive Chemotaxis durch Säuren eine Wirkung der H-Ionen ist, ergibt sich schon daraus, daß alle Säuren wirksam sind, vor allem aber daraus, daß die Wirkung direkt proportional dem Gehalt an H-Ionen steigt. Dementsprechend liegt die Reizschwelle für Schwefelsäure bei $^1/_{200000}$, für Salzsäure bei $^1/_{10000}$, für Wein-

säure bei $^1/_{10000}$, Aepfelsäure bei $^1/_{5000}$ und Essigsäure bei $^1/_{1000}$ mol (über die Bestimmung dieser Schwellenwerte vgl. S. 221). In höheren Konzentrationen, etwa von $^1/_{600}$ mol ab, haben die Säuren repulsive Wirkung, die indes nicht bei allen die gleiche Ursache hat, demnach auch nicht direkt proportional dem H-gehalt geht. Bei schwachen Säuren sind die undissoziierten Moleküle die Ursache der Repulsion, bei starken aber die H-Ionen. Demnach kann eine gewisse Konzentration einer schwachen Säure durch die H-Ionen anlockend, durch die nichtionisierten Moleküle abstoßend wirken. Durch solche antagonistische Wirkung der Komponenten einer Lösung erklären sich die oft beobachteten Ansammlungen der Schwärmsporen in Form von Ringen vor der Kapillare.

Die repulsive Wirkung der Alkalien beruht auf ihrem Gehalt an OH-Ionen; sie wirken noch in viel größerer Verdünnung als die H-Ionen. Saure Salze haben den gleichen Erfolg wie Säuren, basische wie Alkalien; von neutralen Salzen scheint keine Wirkung auszugehen, wenn es sich nicht um ausgesprochene Gifte handelt. Da die Myxomycetenschwärmer in saurem Substrat sich besser entwickeln als im alkalischen, so ist auch hier die chemotaktische Reizbarkeit in zweckmäßiger Weise entwickelt.

Die Reaktionsweise der Myxomycetenschwärmer ist ähnlich wie die der Bakterien. Sie machen beim Uebergang in eine weniger konvenierende Lösung halt, machen eine Wendung und schwimmen in der neuen Richtung gradlinig weiter. Führt sie diese Richtung zufällig direkt zum Zentrum der Diffusion hin, so erreichen sie das Ziel auf dem kürzesten Wege. In der Regel ist ihre Bahn indeß eine sehr viel kompliziertere; erst nach vielen Stillständen und Drehungen erreichen sie die Kapillare (vgl. Fig. 2).

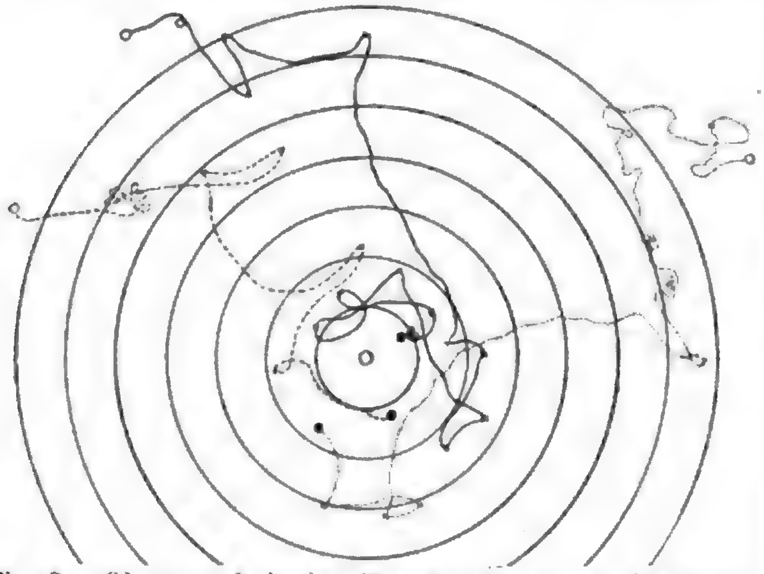


Fig. 2. Chemotaktische Bewegungen von Myxomycetenschwärmern. In der Mitte das Diffusionszentrum einer $^1/_{50}$ mol. Aepfelsäure. Die Kreise sind Punkte gleicher Konzentration. Es ist der Weg eingezeichnet, den drei Schwärmer bei kontinuierlicher Beobachtung ergaben. ○ Stellung des Schwärmers bei Beginn, ● am Ende der Beobachtung (6 bis 8 Minuten), × Schreckbewegung. Nach Kusano.

ζ) Chemotaxis der Plasmodien der Myxomyceten. Die Plasmodien der Myxomyceten unterscheiden sich von allen bisher behandelten Organismen dadurch, daß sie nicht schwimmen, sondern auf festem Substrat in feuchter Luft (nicht unter Wasser) kriechen. Daß ihnen chemotaktische Reizbarkeit zukommt, ist sehr wahrscheinlich, denn Stahl stellte Anziehung durch Loheextrakt, Abstoßung durch Zucker, Glycerin, Kochsalz, Salpeter fest. Da zum Teil zweifellos hoch konzentrierte Lösungen verwendet wurden, so könnte es sich besonders bei der Abstoßung um Osmotaxis handeln. Somit müssen hier neue Untersuchungen einsetzen, die unbedingt auf die Erfahrungen an den Schwärmsporen Rücksicht zu nehmen und auch die Amöben mitzubehandeln hätten.

η) Chemotaxis der Pteridophytenspermatozoen. Die Chemotaxis der Spermatozoen der Filicinen wurde zuerst von Pfeffer studiert, der feststellte, daß sie auf Aepfelsäure reagieren. Wird einem Präparat, das reichlich frisch ausgetretene Spermatozoen in Wasser enthält, eine Kapillare mit 0,01 bis 0,5 Aepfelsäure (die zweckmäßigerweise neutralisiert ist) zugeführt, so sieht man in der kürzesten Zeit die Spermatozoen in der Kapillare gefangen. Pfeffer fand einmal in einer halben Minute schon 60 Stück, nach 5 Minuten 600 Stück in der Kapillare. Die Reizschwelle liegt bei 0,001 %, doch ändert sich dieser Wert nicht unbeträchtlich mit dem Alter der Organismen oder mit äußeren Einflüssen, z. B. der Temperatur. Absolut genommen handelt es sich dabei um winzige Stoffmengen. In einem bestimmten Fall befand sich in der Kapillare nicht mehr als 0,000000028 mg Aepfelsäure und von dieser konnte nur ein kleiner Bruchteil mit dem Körper des Spermatozoons in Berührung kommen. Am Körpergewicht des Spermatozoons gemessen ist aber eine solche Menge schon recht beträchtlich; sie beträgt etwa den 10. Teil desselben. Wäre die Reizschwelle für Zuckerempfindung beim Menschen etwa in gleicher

Proportion zum Körpergewicht entwickelt, so würde das heißen, daß wir erst eine Menge von 15 Pfund Zucker wahrnehmen könnten. Aller Wahrscheinlichkeit nach dürften aber die Reizschwellen bei den Farnspermatozoiden viel tiefer liegen (vgl. S. 221).

So wie bei den Bakterien können wir auch hier eine Empfindlichkeitsverminderung durch homogene Lösungen des Reizmittels konstatieren. Dem Weberschen Gesetz entsprechend muß hier die chemotaktische Reizschwelle stets den 30fachen Wert der homogenen Aepfelsäurelösung besitzen: es liegt demnach die Reizschwelle in 0,0005% Lösung bei 0,015% und in 0,05% Lösung bei 1,5% Aepfelsäure.

Eine Reizbarkeit durch Aepfelsäure konnte bei sehr vielen Pteridophyten konstatiert werden. Sie findet sich nicht nur bei den Filices, sondern auch bei Salvinia (für Marsilea fehlt noch der Nachweis des Chemotaktikums) bei den Equisetaceen, bei Isoetes und Selaginella. Bei den Lycopodien ist auffallenderweise die Zitronensäure chemotaktisch anlockend. Während man nun aber anfangs glaubte, die Pteridophyten reagierten derartig exklusiv auf Aepfelsäure, daß man sie geradezu als Reagentien auf diesen Stoff betrachten könne, haben neuere Untersuchungen von Buller und Shibata ergeben, daß die Farnspermatozoen tatsächlich auf eine große Menge von Chemotaktika reagieren, deren Wirkung teils auf der gleichen Sensibilität beruht, wie die der Aepfelsäure, teils auf ganz anderer.

Auf der gleichen Sensibilität wie die Aepfelsäurewirkung beruht der chemotaktische Erfolg einiger organischer Säuren, die nahe Beziehung zur Aepfelsäure haben. Es sind das zunächst einmal zwei stereoisomere Verbindungen, die Fumarsäure und die Maleinsäure. Sie unterscheiden sich durch die Anordnung der Karboxylgruppe, die bei der Fumarsäure in „Trans"-, bei der Maleinsäure in „Cis"-stellung sich befindet (vgl. den Artikel „Isomerie"). Während nun die Equisetaceen auf diese beiden Säuren gar nicht reagieren, spricht Isoetes nur auf die Fumarsäure, die Farne nur auf die Maleinsäure an. Und dieser Unterschied wiederholt sich bei einer Reihe von Verbindungen, die die gleiche Karboxylstellung aufweisen; so reagieren die Farne auf Citrakonsäure, Isoetes auf Mesakonsäure. Isoetes reagiert aber auch noch auf eine Anzahl von anderen Stoffen mit Transstellung, z. B. Isokamphersäure, Bernsteinsäure, d-Weinsäure, Traubensäure usw., während entsprechende Stoffe mit Cis-Stellung entweder nicht bekannt oder wirkungslos auf die Farne bleiben. Diese Tatsachen können im großen und ganzen durch die sterische Konfiguration der Moleküle erklärt werden, dagegen bleibt die Wirkung der Aepfelsäure auf beide Gruppen, die „fumarophilen" und die „maleinophilen" noch unerklärt. Und an die Aepfelsäure schließen sich noch Monobrombernsteinsäure und Mesoweinsäure an, die wahrscheinlich auf alle Pteridophyten wirken, denen eine Reizbarkeit für Aepfelsäure zukommt.

Nach gewissen Erfahrungen, daß man z. B. durch homogene Maleinsäurelösung die chemotaktische Wirkung der Aepfelsäure aufheben kann, wird man schließen (vgl. S. 222), daß alle diese Säuren die gleiche Sensibilität des Organismus treffen. Da nach den Erfahrungen Pfeffers ferner der Diäthylester der Aepfelsäure unwirksam ist, muß man weiter vermuten, daß nur das Aepfelsäureion selbst und die entsprechenden Ionen der anderen Säuren in Betracht kommen, nicht aber die undissoziierten Moleküle.

Außer dieser Sensibilität haben die Spermatozoen noch eine Sensibilität für gewisse Metallionen (K, Rb, Ca, Sr), ferner für H- und OH-Ionen, für Alkaloide und andere organische Basen. Unter Verweisung auf die Arbeit von Shibata gehen wir auf diese Empfindlichkeit nicht ein. — Trotz aller solcher Erfahrungen ist es auch heute noch wahrscheinlich, daß in der Natur Aepfelsäure oder deren Salze aus dem Archegonhals diffundieren und die Anlockung der Spermatozoiden besorgen.

Auch an Repulsionswirkungen fehlt es bei den Samenfäden der Farne nicht. Sie finden sich bei hohen Konzentrationen der Aepfelsäure, besonders wenn diese in freiem Zustand, nicht als neutrales Salz benutzt wird. Ob da etwa die H-Ionen verantwortlich zu machen sind, muß noch näher untersucht werden. Andere Stoffe: Säuren, Alkalien, Alkohol haben nie attraktive, sondern stets nur repulsive Wirkung, wenn sie nicht völlig wirkungslos sind.

Den Spermatozoen der Farne hat Pfeffer eine ausgesprochene topische Reaktionsweise zugeschrieben: sofortige scharfe Einstellung in die Richtung des Diffusionsgefälles und direktes Lossteuern zum Mittelpunkt der Diffusionsbewegung. Nach den Untersuchungen von Hoyt besitzen sie aber die Reaktionsweise wie die Schwärmsporen der Myxomyceten; sie reagieren also phobisch.

Bei genauerer Ueberlegung ist übrigens auch eine rein topische Reaktionsweise kaum denkbar; denn schon durch die lebhaften Bewegungen der Geißeln kann das Diffusionsgefälle nicht derartig genau erhalten bleiben, wie es die topische Reaktion erfordern müßte.

ϑ) Chemotaxis der Samenfäden der Moose. Auch bei den Samenfäden der Moose kennt man Chemotaxis. Während die Laub-

moose nach Pfeffer auf Rohrzucker reagieren, ist für Marchantia von Lidforss eine Reizwirkung durch Proteinstoffe, von Åkerman für K, Rb, Cs nachgewiesen. Die Marchantiaspermatozoen zeigen auch Aërotaxis, die bei anderen Spermatozoen fehlt.

Eine Chemotaxis bei Spermatozoiden der Algen und Pilze (unter welch letzteren ja wohl nur die Monoblepharideen in Betracht kämen) bleibt noch nachzuweisen.

ι) Perzeption bei der Chemotaxis. Die Perzeption bei der Chemotaxis dürfte wohl allgemein an ein Eindringen des Chemotaktikums in das Protoplasma und chemische Einwirkungsmöglichkeit daselbst gebunden sein. Näheres ist aber nicht bekannt.

1b) Osmotaxis. Wenn wir vermuten dürfen, daß bei der echten Chemotaxis das Reizmittel gerade dadurch, daß es eindringt und mit dem Protoplasma reagiert, zur physiologischen Wirkung gelangt, so muß umgekehrt bei der Osmotaxis ein Nichteindringen des Reizmittels vorausgesetzt werden, denn nur so kann es eine Wasserentziehung bewirken, die wir wohl als Reizanlaß bei dieser Erscheinung ansprechen dürfen (Rothert 1901). Wenn es gelänge nachzuweisen, daß bei einem bestimmten Organismus die Reizschwelle der heterogensten Substanzen bei gleicher molarer Konzentration läge, dann hätten wir einen ganz typischen Fall von Osmotaxis. Das ist aber aus mehreren Gründen nicht möglich. Erstens wird wohl stets Chemotaxis neben der Osmotaxis entwickelt sein, und dann können die chemotaktisch wirksamen Stoffe eine niedrigere Reizschwelle besitzen, also die Gesetzmäßigkeit durchbrechen. Zweitens ist aber auch die Permeabilität des Protoplasmas für verschiedene Stoffe sehr verschieden und im einzelnen meist nicht genau bekannt; und nur Stoffe, für die das Plasma impermeabel oder sehr wenig permeabel ist, können osmotaktisch wirken. Somit ergibt sich, daß in der Praxis der Nachweis, ob Chemotaxis oder Osmotaxis vorliegt, trotz der großen prinzipiellen Unterschiede zwischen den beiden Erscheinungen sehr häufig nicht geführt werden kann. Uebrigens fehlt es auch noch an eingehenden Studien. Trotzdem wird man nicht an der Existenz der Osmotaxis zweifeln.

Bei den meisten Organismen kann es sich nur um negative Osmotaxis handeln, um ein wohl stets phobisches Zurückprallen vor zu starker Konzentration des Reizmittels. Nur die Bewohner konzentrierter Substrate, vor allem also die Meerespflanzen, können auch vor verdünnten Lösungen fliehen, also positiv osmotaktisch sein. Nach dem oben Gesagten ist es begreiflich, daß es gegenwärtig nicht ganz leicht zu sagen ist, bei welchen Organismen Osmotaxis sich findet. Zuerst hat Pfeffer die von ihm beobachtete Abstoßung des Spirillum undula durch konzentrierte Lösungen auf Osmotaxis zurückgeführt. Er fand die Repulsionswirkung durch 6% Zucker und 1% Salpeter, d. h. durch annähernd isosmotische Lösungen; da aber Zucker wie Salpeter in schwachen Lösungen positiv chemotaktisch wirken, so ist nicht einzusehen, warum ihre abstoßende Wirkung nicht gleichfalls chemotaktischer Natur sein könnte. Pfeffer hat denn auch später hier Chemotaxis angenommen. — Am besten ist wohl bei gewissen Bakterien durch Massart die Osmotaxis nachgewiesen. Er fand, daß man eine positiv chemotaktische Anlockung durch isosmotische Lösungen verschiedener Stoffe aufheben kann. Andererseits steht aber auch ganz sicher fest, daß manche Organismen, z. B. gerade gewisse Bakterien, eine osmotische Sensibilität durchaus nicht besitzen, sahen wir doch, daß Bacterium termo in hochkonzentrierte Lösungen hineinsteuert, in denen es den Tod findet. Vielleicht sind das gerade Organismen, die ein sehr leicht permeables Protoplasma besitzen.

Zweifellos steht die Reizerscheinung, die man bei den Plasmodien der Myxomyceten als Hydrotaxis bezeichnet, in sehr nahem Zusammenhang mit der Osmotaxis. Abstoßende Erfolge konzentrierter Substanzen sind schon oben S. 224 für diese Organismen erwähnt worden; es ist recht wahrscheinlich, daß es sich da um osmotische, nicht um chemische Wirkung handelt. So gut wie durch Exosmose kann aber einem in Luft lebenden Plasmodium auch durch Verdunstung Wasser entzogen werden. Tatsächlich wissen wir, daß Plasmodien nach feuchten Stellen hinwandern, bezw. von zu trocknen zurückfliehen, und man nennt das positive Hydrotaxis. Es leuchtet ein, daß sie mit negativer Osmotaxis identisch sein muß. Eine solche hydrotaktische Reizbarkeit ist bei einem Organismus, der auf feuchte Luft angewiesen ist, da er ja auch des elementarsten Transpirationsschutzes entbehrt, wohl verständlich. Oekologisch begreiflich ist aber auch die Aenderung der Reaktionsweise, das Auftreten von negativer Hydrotaxis in dem Moment, wo das Plasmodium sich anschickt, seine Sporen auszubilden, denn die Sporen können nur in trockener Umgebung ausgebildet und verbreitet werden.

1c) Phototaxis. Durch Phototaxis suchen sich Organismen, die aus irgendeinem Grund in ihrer Existenz vom Licht abhängen, die für sie günstigste Beleuchtung auf. Dementsprechend finden wir eine phototaktische Reizbarkeit vor allem bei grünen Flagellaten, Volvocineen und Schwärmsporen; daneben auch bei manchen Purpurbakterien (Chro-

matium). Es gibt aber auch grüne Schwärmer, die phototaktisch unempfindlich sind und andererseits farblose phototaktische Formen. Letzteres trifft für Arten der Gattungen Chytridium, Rhizophidium, Polyphagus und Bodo zu, die sich meistens von grünen Algen ernähren, also imstande sein müssen, diese aufzusuchen. Den Spermatozoen pflegt Phototaxis zu fehlen.

α) Die Phototaxis der Purpurbakterien. Die Phototaxis der Purpurbakterien dürfte sich nach den Untersuchungen Engelmanns am einfachsten gestalten. Gerade wie viele farblose Bakterien auf den Wechsel der Konzentration gewisser Stoffe hin eine sogenannte „Schreckbewegung" ausführen, so prallt auch Chromatium, wenn es plötzlich verdunkelt wird, zurück, kommt zur Ruhe und nimmt dann meist mit etwas veränderter Richtung von neuem seine Vorwärtsbewegung auf. Ist es durch die Rückwärtsbewegung aus der Dunkelheit herausgekommen, so kann es bei der neuen Vorwärtsbewegung abermals in diese geführt werden; dann tritt die gleiche Reizerscheinung wieder auf. So sammeln sich notwendig diese Organismen an einem beleuchteten Fleck an, wenn die Umgebung dunkler ist, weil sie bei jedem Versuch, sich aus dieser „Lichtfalle" herauszubegeben, immer wieder zurückprallen. Ein Mittel, die ihnen zusagende Helligkeit aufzusuchen, haben sie aber nicht, ihr Hineinbegeben in die helle Stelle erfolgt ganz zufällig.

β) Die Phototaxis der grünen Flagellaten und Schwärmsporen. Bei den grünen Flagellaten und Schwärmsporen gestalten sich die phototaktischen Bewegungen etwas anders. Da diese Organismen oft in so großen Massen auftreten, daß sie das Wasser grün färben, kann man ihre Bewegungen auch ohne Mikroskop verfolgen. Hat man etwa die großen Kugeln von Volvox zur Verfügung, so kann man auch die einzelnen Individuen mit bloßem Auge beobachten. Setzt man nun eine solche Massenkultur einseitiger Beleuchtung aus, stellt man sie z. B. in einem Zimmer in einiger Entfernung vom Fenster auf, so sieht man meist in kürzester Zeit sämtliche Schwärmer an der Fensterseite der Schale sich ansammeln. Dreht man dann die Schale um 180°, so tritt alsbald eine Umordnung der Organismen in dem Sinn ein, daß sie wieder der helleren Seite zueilen. Daß nicht jede solche Gruppierung von Schwärmsporen eine phototaktische sein muß, daß vielmehr durch Wasserströmungen auch in rein mechanischer Weise Ansammlungen auftreten können, hat Sachs gezeigt. In der Regel wird aber ein Zweifel nicht bestehen, ob es sich im Einzelfall um Phototropismus handelt oder nicht. — Die geschilderten Erscheinungen gelten nur für verhältnismäßig schwaches Licht. Setzt man die Kultur dem direkten Sonnenlicht aus, so suchen die Schwärmer aus diesem zu entfliehen und beschattete Orte zu erreichen. Sie sind also je nach der Lichtintensität bald positiv, bald negativ phototropisch. Zwischen den extremen, positiv oder negativ phototropisch wirkenden Intensitäten liegen dann aber andere, mittlere Intensitäten, die gar nicht phototropisch reizen. Wir betrachten diese als die optimalen, deren Aufsuchung die Phototaxis gilt. Diese optimale Beleuchtung ist nicht für alle Exemplare eines Organismus die gleiche. Als Oltmanns den Volvoxkugeln eine weitgehend abgestufte Beleuchtung bot, sammelten sich die weiblichen Kolonien an dunkleren Stellen als die ungeschlechtlichen. Es hängt also die Lichtstimmung sichtlich vom Entwickelungszustand des Organismus ab, sie wird aber auch von äußeren Umständen in maßgebender Weise beeinflußt. Sie wird z. B. durch andauernde starke Beleuchtung, durch hohe Temperatur erhöht, d. h. es werden nach solcher Vorbehandlung höhere Lichtintensitäten aufgesucht, die zuvor vielleicht schon geflohen wurden. Aehnlich wirken Kohlensäure, schwache organische Säuren, Chloroform, während andere Stoffe, z. B. anorganische Nährsalze oder Aether die phototaktische Reizbarkeit ganz aufheben können. — Die Umstimmung von positiver zu negativer Reaktionsweise kann oft sehr rasch geschehen; so sah Strasburger Schwärmer ganz plötzlich ohne äußeren Anlaß ihren bisherigen Ort verlassen und an den anderen Rand des Gefäßes eilen, wo ihnen eine andere Lichtintensität geboten wurde.

Alle bisher vorliegenden Untersuchungen leiden übrigens an einem methodischen Fehler. Es sind die von den Wänden der Kulturgefäße reflektierten Strahlen nicht genügend berücksichtigt worden, so daß oft ganz falsche Vorstellungen über die Lichtverteilung in den Versuchsräumen bestanden (Chmielewski 1904). Damit hängt es auch z. T. zusammen, daß in einer viel behandelten Frage keine Einigkeit erzielt werden konnte: Wie beim Phototropismus, so hat man auch bei der Phototaxis die Frage aufgeworfen, ob diese Reizbewegung durch die Richtung oder durch die Intensität des Lichtes bedingt sei. Ein Zweifel besteht ja nicht darüber, daß im allgemeinen die Schwärmsporen bei einseitiger Beleuchtung ihre Längsachse in die Richtung der Lichtstrahlen einstellen, und dann je nach Umständen sich der Lichtquelle nähern oder von ihr entfernen. Auch kann man bei Aenderung der Lichtrichtung eine entsprechende Drehung der Schwärmsporen beobachten. Andererseits kann man aber auch nicht daran zweifeln, daß es für die Pflanze nicht auf die

Richtung der sie durchsetzenden Lichtstrahlen ankommen dürfte, sondern nur auf Gewinnung einer optimalen Lichtintensität. Oltmanns glaubte die Frage entschieden zu haben. Er brachte vor einem parallelwandigen Gefäß, das Volvox enthielt, ein spitzwinkliges, mit Tuschelösung gefülltes Glasprisma an. Schien auf dieses senkrecht die Sonne, so sollte das Kulturgefäß von parallelen Lichtstrahlen durchsetzt sein und dabei eine allmähliche Abstufung der Lichtintensität aufweisen vom einen zum anderen Ende. In einem solchen Gefäß ordnet sich aber Volvox in ganz bestimmter Weise an, so daß jedes Individuum die ihm passende Intensität aufsucht und an dieser Stelle vertikale Bewegungen aufwärts und abwärts ausführt. Es geht aus diesem Versuch zunächst mit Sicherheit hervor, daß die Volvoxkolonien, wenn sie erst die optimale Lichtintensität gefunden haben, überhaupt nicht phototaktisch sind, trotz des einseitigen Lichteinfalles nicht ihre Achse in die Lichtrichtung, sondern in die Vertikale einstellen. Wie sie aber die optimale Intensität aufgesucht haben, darüber sagt der Versuch nichts aus. Wenn wirklich die Lichtverteilung im Kulturgefäß so wäre, wie Oltmanns annimmt, dann könnten die Volvoxkolonien wie die Purpurbakterien nur durch Zufall an diese Stellen gelangt sein und daselbst durch phobische Reaktionen festgehalten werden. Tatsächlich muß aber allein schon durch die Erfüllung des Wassers mit Volvoxkugeln eine ganz andere Verteilung des Lichts herrschen. Da von jedem Volvox Licht ausgeht, so müssen in dem Wasser auch Strahlen senkrecht zu den von außen kommenden auftreten und wenn diese von der hellen Seite des Gefäßes zur dunkleren gehen, so könnte sich unter ihrem Einfluß die Gruppierung der Organismen vollzogen haben.

Demnach läuft unsere Frage darauf hinaus, ob die phototaktischen Bewegungen phobischer oder topischer Natur (vgl. S. 220) sind. Und in dieser Beziehung bestanden lange Zeit große Unklarheiten, die jetzt durch die Untersuchungen von Jennings einigermaßen beseitigt sein dürften. Wir halten uns an seine Studien an Euglena. Dieser Flagellat zeigt an seinem Vorderende eine deutliche Dorsiventralität: auf der ventralen Seite findet sich in einer Einkerbung die Geißel, auf der dorsalen eine rote Pigmentmasse, der sogenannte Augenfleck. Die Bewegung erfolgt in langgezogenen Schraubenlinien. Wird nun die Lichtintensität plötzlich vermindert, so wird die Bewegung sistiert, oder es tritt sogar eine Rückwärtsbewegung ein („Fluchtreaktion"). Darauf folgt dann eine sehr eigentümliche Bewegung, die in Figur 3 dargestellt ist: der Flagellat rotiert ohne von der Stelle zu kommen in einem Kegelmantel. Je nach der Intensität der Reizung ist der Winkel, den der Kegel mit seiner Achse bildet, kleiner oder größer. Bei starker Reizung wird er ein rechter! Nach einiger Zeit nimmt dann die Euglena wieder die Vorwärtsbewegung auf. Da sie aus einer der Lagen, die in Figur 3 mit 2 bis 6 bezeichnet sind, in die Vorwärtsbewegung übergeht, ist die Richtung derselben unter allen Umständen eine andere als früher. Schon Engelmann hat konstatiert, daß zur Erzielung einer derartigen Reizung bei Euglena keineswegs eine Beschattung des ganzen Körpers nötig ist. Wenn man ein minimales Stück des vorderen farblosen Teiles verdunkelt, so erhält man schon den gleichen Effekt, wie bei Beschattung des ganzen Körpers. Eine Verdunklung des Hinterendes ist ganz ohne Erfolg. Und im Vorderende genügt schon die Verdunklung der vor dem Augenfleck gelegenen Stelle. Daraus wird man schließen müssen, daß der Augenfleck seinen Namen nicht mit Recht trägt, da er zum mindesten keine direkte Beziehung zur Lichtperzeption hat. Das gleiche wird man übrigens aus der Tatsache schließen, daß die S. 227 genannten farblosen phototropischen Organismen überhaupt keinen Augenfleck besitzen.

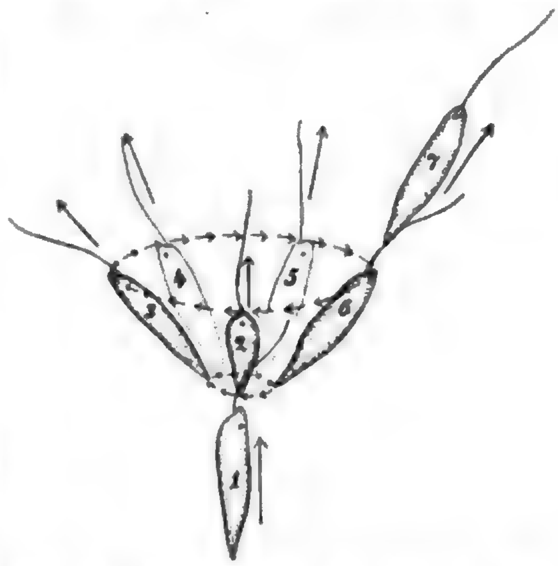


Fig. 3. Schema der Reaktion von Euglena bei Abnahme der Belichtung. Nach Jennings.

Was wir bisher bei Euglena kennen lernten, war eine ausgesprochene phobische Reaktion auf Lichtverminderung. Nur bei sehr starker Beleuchtung kann ein entsprechender Erfolg auch durch Erhellung erzielt werden. — Wir fragen jetzt nach dem Einfluß der Lichtrichtung, untersuchen also, wie sich Euglena verhält, die nach einseitig einfallendem Licht hinschwimmt, wenn dieses plötzlich seine Richtung ändert. Es erfolgt auch jetzt eine

Schreckbewegung, ein Stillstand und ein Rotieren im Kegelmantel. Das Vorderende schwingt nun in einem weiten Kreise herum und richtet sich sukzessive nach verschiedenen Richtungen. An irgendeiner Stelle seiner Kreisschwingung wird natürlich das Vorderende näher nach dem Licht hin gewendet; daraufhin nimmt die Stärke der Schwingung ab, so daß die Euglena eine bestimmte so erreichte Stellung beizubehalten sucht (Jennings). Hat die Euglena durch Rotieren im Kegelmantel („Probierreaktion" Jennings) diese Richtung gefunden, in der keine Reizung eintritt, so nimmt sie in ihr die Vorwärtsbewegung wieder auf. Eventuell wird aber die richtige Einstellung auch erst nach mehreren sukzessiven Schreckbewegungen gefunden (Fig. 4).

Es wird Aufgabe weiterer Untersuchungen sein, festzustellen, ob bei den Schwärmsporen und Volvocaceen die phototaktischen Reaktionen mit den eben bei Euglena geschilderten übereinstimmen. Einstweilen spricht nichts dagegen. Doch wird vor allen Dingen der Sitz der Lichtempfindlichkeit bei diesen Formen festzustellen, namentlich auch das Verhalten der koloniebildenden Formen zu studieren sein. Daß diese alle nicht radiär sind, steht schon jetzt fest; daß sie auch polare Differenzen aufweisen, ist jedenfalls wahrscheinlich. So weit wir also heute wissen, handelt es sich bei der Phototaxis in erster Linie um eine phobische Reaktion, bei der dementsprechend auch die Lichtintensität die Hauptrolle spielt. Daß es aber durch eine besondere Schreckreaktion, die man auch mit Jennings „Probierreaktion" nennen kann, zur Einstellung in die Lichtrichtung kommt, haben wir gesehen. Hervorzuheben ist noch, daß diese Einstellung eben doch in ganz anderer Weise erfolgt als man früher dachte. Man nahm an, daß der taktische Organismus in der gleichen Weise auf einseitiges Licht reagiere, wie der festgewachsene Stamm oder die Wurzel. Machen diese eine phototropische Krümmung, so macht der bewegliche Organismus eine Wendung, die ihn sofort in die Lichtrichtung führt. Das war es, was man unter topischer Reaktionsweise sich dachte.

γ) Die Phototaxis der kriechenden Formen. Auch bei kriechenden Formen kommt Phototaxis vor, bei Myxomyceten, Diatomeen, Desmidieen und manchen Fadenalgen. Die Plasmodien der Myxomyceten zeigen, soweit bekannt, immer nur negative Reaktion, sie ziehen sich vor jedem stärkeren Licht zurück. Ganz eigenartig sind die Verhältnisse bei den Desmidiaceen (Aderhold). Diese einzelligen Algen sind einseitig dem Substrat durch Schleimfüße angeheftet und gleiten mit deren Hilfe in der Richtung zur Lichtquelle oder von ihr weg. Das freie Ende der Zelle ist nach oben gerichtet und bei positiver Phototaxis dem Licht zugekehrt, bei negativer von ihm abgewendet; die Längsachse der Zelle bildet mit dem Substrat einen Winkel von etwa 45°. Manche Closterien verhalten sich insofern anders, als bei ihnen abwechselnd das eine oder das andere Ende der Zelle festgeheftet wird; sie überschlagen sich also von Zeit zu Zeit.

Noch weniger als die eben genannten

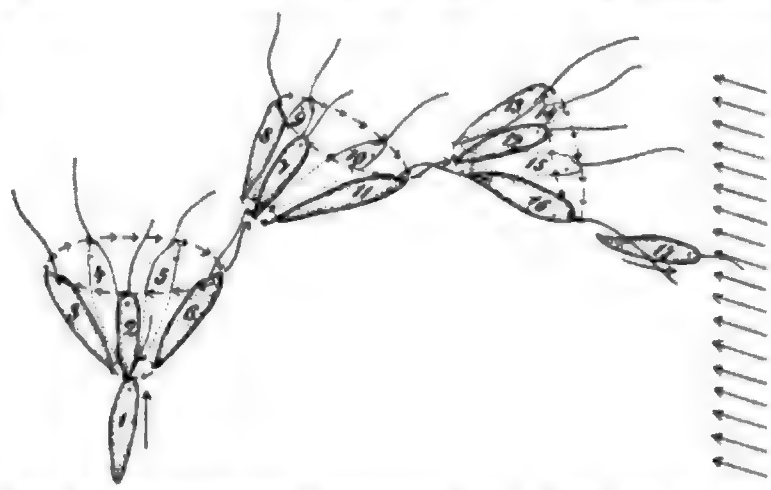


Fig. 4. Schema der Reaktion einer Euglena, die zunächst in Richtung des Pfeils bei 1 vorwärts schwimmt und dann von einseitigem Licht (in Richtung der Pfeile rechts) getroffen wird. Nach Jennings.

phototaktischen Bewegungen sind die der Diatomeen (Richter 1906) und der Fadenalgen (Zygnemaceen, Oscillarien) studiert, so daß wir nicht auf sie eingehen können.

δ) Lichtqualität. Im allgemeinen wird wie der Phototropismus so auch die Phototaxis durch die stärker brechbaren Strahlen bestimmt. Statt Verdunklung kann man also eine Abblendung des grünen und blauen Lichtes durch eine rote Scheibe vornehmen, was die Beobachtung sehr erleichtert. Nach Engelmann verhalten sich die lichtempfindlichen Purpurbakterien ganz anders als die grünen Schwärmer, da sie auf rotes und ultrarotes Licht reagieren.

ɪd) Thermotaxis. Man wird zweckmäßigerweise jede durch strahlende Energie erzielte Orientierung freibeweglicher Organismen als phototaktische bezeichnen, mag es sich da um Lichtstrahlen oder wie bei den Purpurbakterien um „Wärmestrahlen" handeln. Von Thermotaxis aber wird man nur reden, wenn eine Richtungsbewegung durch geleitete Wärme in Betracht kommt.

Eine solche findet sich bei Infusorien, Euglenen, Amöben und Myxomyceten. Nur der letztere Fall interessiert uns hier. Werden Fuligoplasmodien auf feuchtes Filtrierpapier gebracht, das auf der einen Seite in wärmeres auf der anderen in kälteres Wasser taucht, so wenden sie sich zum wärmeren hin, so lange dieses unter 33° bleibt. Wird diese Temperatur aber überschritten, so tritt negative Thermotaxis ein, das Plasmodium geht zum kälteren Wasser. Bei mittleren Temperaturen genügt eine Differenz von etwa 10°, um positive Thermotaxis auszulösen.

1e) Galvanotaxis. Unter Galvanotaxis versteht man die Orientierungsbewegungen freibeweglicher Organismen durch den galvanischen Strom, die man positive oder negative nennt, je nachdem sie zu einer Ansammlung am positiven oder negativen Pol führen. Solche Bewegungen sind vor allem bei Tieren (Froschlarven, Amöben, Infusorien), doch auch bei einigen Volvocaceen, Flagellaten und Bakterien beobachtet worden. Zum Nachweis dieser Reizbewegungen bedient man sich eines mikroskopischen Präparats, dessen Deckglas auf zwei Tonleisten ruht, an die dann die unpolarisierbaren Elektroden direkt angelegt werden. Sowie der Strom geschlossen wird, tritt die Ansammlung der Organismen an der einen Tonleiste auf; durch Umkehr des Stromes werden sie an den anderen Pol übergeführt. Daß es sich dabei um typische Reizbewegungen und nicht etwa um kataphorische Wirkungen des Stromes handelt, ergibt sich schon daraus, daß tote Organismen nicht an den Pol geführt werden, und daß der gleiche Strom manche Objekte zum positiven, andere zum negativen Pol zu wandern veranlaßt. Als die typische Reaktion pflegt man die positive zu betrachten, weil bei mäßiger Stromstärke die meisten Organismen positiv galvanotaktisch reagieren. Vielfach gelingt es aber durch Verstärkung des Stromes eine Reaktionsänderung herbeizuführen, negative Reaktion zu erzielen.

Von mehreren Autoren, vor allem von Loeb, ist die Ansicht ausgesprochen worden, daß die Galvanotaxis nicht auf einer Empfindlichkeit des Organismus für den elektrischen Strom selbst beruht, sondern daß sie eine Art Chemotaxis sei, daß es sich also um chemische Wirkungen handelt, die von dem Strom ausgehen. Da solche chemische Wirkungen des Stromes zur Genüge bekannt sind und notwendigerweise einen Einfluß auf die Organismen haben müssen, so hat die Ansicht Löbs manches Bestechende. Sie ist aber durchaus nicht bewiesen und es stehen ihr auch mancherlei Bedenken gegenüber (Pfeffer 1904, Jennings 1910).

Nach Jennings würde die Galvanotaxis noch am ehesten den Vorstellungen entsprechen, die man früher von einer topischen Taxis sich gemacht hat. Denn Jennings fand, daß bei Infusorien zwei Seiten des Körpers auf den Strom hin in ganz verschiedener Weise arbeiten, so daß durch ihre Tätigkeit eine Drehung und Einstellung in die Stromrichtung zustande kommt. Bei allen anderen Taxien fand Jennings immer den ganzen Körper einheitlich reagieren. Man wird abwarten müssen, ob auch bei den Organismen, die uns an dieser Stelle mehr interessieren als Infusorien, ähnliche Verhältnisse vorliegen.

1f) Geotaxis. Euglena, Chlamydomonas, Hämotococcus, Ulothrixschwärmer, Polytoma und einige Spirillen begeben sich stets zur Oberfläche der Flüssigkeit, in der sie kultiviert werden, auch wenn sie nicht durch chemische Mittel, z. B. Sauerstoff, dahin gelockt werden. Da sie schwerer sind als Wasser, muß dieses Aufsteigen unter Kraftaufwand erfolgen. Zentrifugalversuche zeigen, daß Euglenen und Chlamydomonas auch der Schleuderkraft entgegen wandern und erst bei etwa 8 g (vermutlich rein mechanisch) nach außen gelangen. Handelt es sich in diesen Fällen um negative Geotaxis, so ist für andere Organismen positive Geotaxis beschrieben worden; nach Massart soll eine Chromulina bei 6 bis 7° positiv, bei 15 bis 20° negativ geotaktisch reagieren.

Ob es sich bei der Geotaxis um eine Reizbarkeit handelt, die man den übrigen Taxien ohne weiteres an die Seite stellen kann, ist sehr fraglich; denn eine geotaktische Aufwärtsbewegung z. B. bringt den Organismus ja nicht in Bedingungen, unter denen die Einwirkung der Schwerkraft verändert wird, während ihn eine phototaktische Bewegung in andere Lichtintensitäten, eine chemotaktische oder osmotaktische in andere Konzentrationen führt. — Es wird jedoch für einen Organismus zweifellos nützlich sein, wenn er nach Bedürfnis hohe oder tiefe Schichten aufsuchen kann. Dann liegt aber auch die Vermutung nahe, daß er eine Empfindung dafür besitzt, wie tief er sich in der Flüssigkeit befindet. Eine solche Empfindung kann aber nicht durch die Schwerkraft direkt bewirkt werden, wohl aber könnte sie durch Perzeption des Druckes der Flüssigkeit vermittelt werden. In der Tat hat Jensen (1893) die Geotaxis auf Perzeption von Druckdifferenzen zurückzuführen gesucht, freilich ohne daß es ihm gelungen ist, einen exakten Beweis dafür zu liefern. In diesem Fall bestände dann keinerlei Beziehung zwischen Geotaxis und Geotropismus und erstere wäre am nächsten an die folgende Reizbewegung anzugliedern.

1g) Thigmotaxis. Pfeffer hat beobachtet, daß Chlamydomonas, wenn sie mit

den Wimpern an einen Körper anstößt, eine typische Schreckbewegung durchmacht. Die Geißeln strecken sich plötzlich nach vorn gerade, der Körper prallt zurück und nimmt gewöhnlich nach einer kleinen Drehung die Vorwärtsbewegung wieder auf. Er nannte diese Reizbewegung „Thigmotaxis“ und stellte fest, daß es nicht gerade einer Berührung mit einem festen Körper bedarf, daß auch Berührung mit Gallerten den gleichen Effekt haben kann. Ueber die Verbreitung der Erscheinung ist noch wenig bekannt.

1h) Rheotaxis. Die Rheotaxis schließen wir hier an, weil es sich auch bei ihr wie bei Geotaxis und Thigmotaxis um mechanische Beeinflussung zu handeln scheint. Sie ist in erster Linie bei kriechenden Organismen, vor allem bei den Myxomycetenplasmodien, selten bei Schwimmern (Literatur bei Verworn 1909) beobachtet worden. Befindet sich ein Plasmodium auf feuchtem Filtrierpapier, das einer vertikalstehenden Glasplatte anliegt und gehen durch dieses Fließpapier langsame Ströme von Wasser, wie man sie erhält, wenn man durch einen Streifen von Fließpapier aus einem höheren Niveau Wasser abfließen läßt, so bewegt sich das Plasmodium entgegen der Schwerkraft nach oben. Daß es sich dabei nur um die Druck- oder Stoßwirkung der Wasserteilchen handeln kann, die an das Plasmodium anprallen, zeigt ein Versuch von Clifford, nach dem es ganz gleichgültig ist, ob destilliertes Wasser oder eine verdünnte Nährlösung gegen das Plasmodium strömt; chemische Wirkungen spielen also zweifellos keine Rolle. Clifford hat auch versucht, festzustellen, wie schnell der Wasserstrom sein darf, um noch Rheotaxis auszulösen; doch bestehen erhebliche Bedenken gegen seine Methode.

2. Taxien der Zellorgane. **2a)** Chloroplasten. Für die Chloroplasten sind eine Reihe von Reizbewegungen beschrieben worden, die große Aehnlichkeit mit der Phototaxis, Chemotaxis, Osmotaxis und Thermotaxis freibeweglicher Organismen aufweisen und dementsprechend auch die gleichen Namen führen. Bei weitem am wichtigsten und am eingehendsten studiert ist die Phototaxis.

α) Phototaxis. Die Chloroplasten begeben sich unter allen Umständen an die Stelle der Zelle, wo sie optimale Beleuchtung vorfinden, bei mittlerer Lichtintensität suchen sie helle, bei starker beschattete Stellen auf. Dabei reagiert jedes Chlorophyllkorn selbständig und in vielen Fällen besteht im Verhalten der einzelnen Körner schon deshalb ein großer Unterschied, weil sie sich gegenseitig beschatten. Wie bei freibeweglichen Organismen existiert auch hier eine „Stimmung“. Die als optimal empfundene Lichtintensität ist also nicht immer die gleiche, sondern sie hängt z. B. von der Temperatur und von chemischen Einflüssen ab; die Chloroplasten suchen bei tiefer Temperatur niedrigere Lichtintensitäten auf als in hoher; auch ein Zusatz von Nährlösung läßt sie höheren Intensitäten sich zuwenden.

In welcher Weise die Chloroplasten reagieren, ob da irgendwelche Aehnlichkeiten mit der phobischen oder der topischen Reaktionsweise der Schwärmer bestehen, ist um so weniger zu sagen, als wir die Bewegungsmittel der Chloroplasten überhaupt nicht kennen. Ob sie sich aktiv bewegen oder durch die Tätigkeit des Plasmas verlagert werden, ist nicht sicher gestellt. Senn schreibt den Chloroplasten im Anschluß an früher von anderer Seite entwickelte Vorstellungen eine Hülle von farblosem Plasma zu, die amöbenartige Bewegung vermitteln soll. Bewiesen ist diese Hypothese durchaus nicht.

Bei aller Uebereinstimmung im ganzen verhalten sich nun aber die Chloroplasten je nach dem Bau der Zelle und der durch ihn bedingten Lichtverteilung im einzelnen so verschieden, daß Senn nicht weniger als 7 Typen[1]) aufstellen konnte. Wir berichten über diese ganz kurz, ohne auf ihre Verbreitung näher einzugehen.

1. Mesocarpustypus. Die zylindrische Zelle enthält einen einzigen Chloroplasten, der die Gestalt einer rechteckigen Platte hat. Sie durchzieht für gewöhnlich die Zelle axial, nimmt aber bei niedriger Temperatur eine seitliche Lage, dicht an der Zellwand an. In Licht mittlerer Intensität stellt sich die Chlorophyllplatte senkrecht zu den Lichtstrahlen (Flächenstellung, Fig. 5, I) und sie folgt dann jeder Veränderung der Lichtrichtung durch eine entsprechende Drehung. Wird aber das Licht plötzlich um 180° gedreht, so bleibt die Platte wie sie war, ihre beiden Seiten sind also physiologisch gleichwertig. Bei der Drehung der Platte kommt es nicht selten zu Torsionen dadurch, daß an verschiedenen Enden einer Platte eine verschiedene Drehungsrichtung eingeschlagen wird. — Bei intensivem Licht stellt sich die Platte in Profilstellung, d. h. sie wendet dem Licht mehr oder minder ausgesprochen ihre Kante zu (Fig. 5, II). Durch Einnahme

[1]) Für die Lagerung der Chloroplasten sind zahlreiche Ausdrücke geschaffen worden, die wir nachstehend mitteilen (vgl. Senn 1908). Epistrophe = Lagerung der Chloroplasten an den freien Außenwänden der Zelle. Apostrophe = Fugenwandlage. Systrophe = Ansammlung um den Kern. Peristrophe = gleichmäßige Verteilung der Chloroplasten im ganzen Wandbelag der Zelle. Antistrophe = Lagerung auf der Vorderseite, Diastrophe = auf Vorder- und Rückseite. Parastrophe = Flankenlage. Escharastrophe = Lagerung im Brennpunkt der Zelle.

der beiden geschilderten Lagen oder von Uebergängen zwischen ihnen kann die Platte sich stets eine optimale Lichtmenge einfangen. — Rotes Licht soll nach Senn in jeder

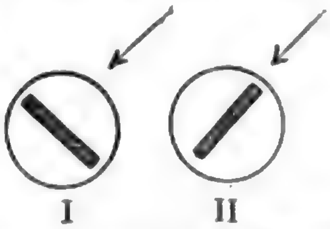


Fig. 5. Mesocarpuszelle. Im Querschnitt. Das schraffierte Rechteck deutet den Chloroplasten an, der Pfeil die Lichtrichtung. I schwaches, II starkes Licht.

Intensität die Flächenstellung bewirken, blaues aber in hoher Intensität zur Profilstellung führen.

2. Vaucheriatypus. Wird der zylindrische Vaucheriafaden in Luft einseitig durch Licht mittlerer Intensität beleuchtet, so ordnen sich die Chloroplasten an den beiden hellsten Seiten der Zelle, auf der Vorderseite und Rückseite an, die Flanken bleiben frei. In Wasser wird die Verteilung anders, wie Senn ausführt, entsprechend der anderen Verteilung des Lichtes. In starkem Licht sammeln sich die Körner auf den Flanken, wo die Zelle am dunkelsten ist. Sie nehmen aber durchaus nicht in dem Maße eine bestimmte Richtung zu den Strahlen ein, daß man wie bei Mesocarpus von Profilstellung sprechen könnte. Auch in der Längsrichtung der Zelle sind die Chloroplasten verschiebbar, und sie sammeln sich an einzelnen beleuchteten Punkten an.

3. Chromulinatypus. Die Zellen sind, wie das namentlich durch Noll für das Protonema von Schistostega bekannt ist, so gebaut, daß die Lichtstrahlen sich am hinteren Ende der Zelle sammeln; hier lagern sich denn auch bei mäßiger Lichtintensität die Chloroplasten (Fig. 6), die aber bei Zunahme

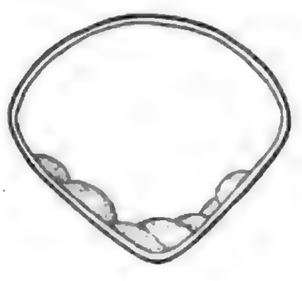


Fig. 6. Schistostega. Protonemazelle. Brennpunktlage (Escharostrophe) der Chromatophoren.

der Beleuchtung an einer Seitenwand Schatten suchen.

4. Eremosphaeratypus. Bei mittlerer Intensität findet man die Chloroplasten im ganzen protoplasmatischen Wandbelag verteilt; hohe Intensität treibt sie ins Zentrum der Zelle, wo sie sich um den Kern scharen (Fig. 7).

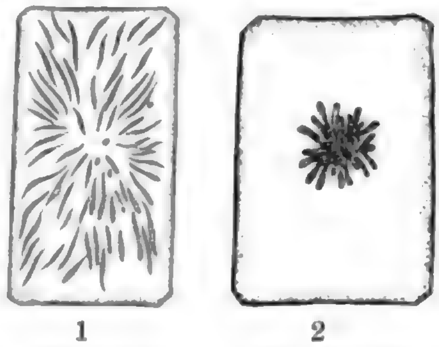


Fig. 7. Striatella. 1 Chromatophoren in Peristrophe. 2 Chromatophoren in Systrophe (kontrahiert). Nach Senn.

5.—7. Typus. Zum Unterschied von den bisher besprochenen Fällen handelt es sich hier nicht um einzelne Zellen, sondern um solche, die mindestens in einer Ebene mit anderen verbunden sind, oder die zu einem Zellkörper zusammengetreten sind. Wie Senn ausführt, wird dadurch außer der Lichtwirkung auch ein Einfluß der Nachbarzellen ermöglicht, der sich nicht nur in einer Schattenwirkung, sondern auch in chemischen Wirkungen äußern soll. So kommt es wohl, daß man hier meist neben einer Stellung, die für mittlere und einer die für hohe Lichtintensität charakteristisch ist, auch noch eine distinkte Nachtstellung findet.

5. Funariatypus. Die zwei Lichtstellungen stimmen mit dem Vaucheriatypus überein, bei mittlerem Licht liegen die Chloroplasten den Außenrändern, bei sehr hellem den Seitenrändern an; es kommt noch eine Nachtstellung hinzu, die hier äußerlich mit der Stellung bei intensivem Licht übereinstimmt.

6. Schwammparenchymtypus. Die beiden Lichtstellungen stimmen mit denen

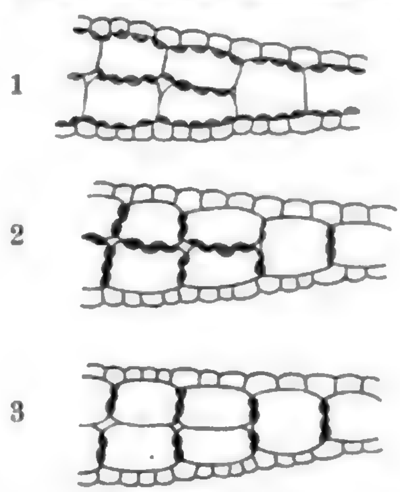


Fig. 8. Lemna trisulca. Querschnitt. 1 Im Licht mittlerer Intensität. 2 Verdunkelt. 3 Besonnt. Nach Senn.

des Funariatypus überein; bei der Nachtstellung aber werden alle Wände aufgesucht, die an andere Parenchymzellen anstoßen, die Außenwände aber verlassen (Fig. 8). Im Schwammparenchym eines komplizierten Blattes werden die Chlorophyllagerungen komplizierter durch Einfluß der darüberbefindlichen Palisaden auf die Lichtverteilung (Fig. 9).

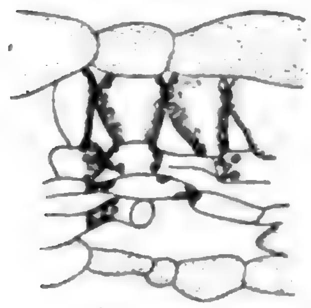


Fig. 9. Phaseolus vulgaris. Blattquerschnitt. Das Blatt war nach Injektion der Interzellularen 3 Stunden von oben her besonnt worden. Nach Senn.

7. Palisadentypus. Die Chloroplasten sitzen hier gewöhnlich in gleichmäßiger Verteilung den Längswänden an und machen keine Ortsveränderungen, sondern nur Formänderungen durch. Bei stark von der Seite kommenden Strahlen können sie aber auch phototaktisch reagieren.

β) Andere taktische Bewegungen der Chloroplasten. Ueber andere taktische Bewegungen der Chloroplasten können wir uns kurz fassen. Thermotaxis und zwar positive konnte Senn beobachten, als er auf der Oberseite bereifte Laubblätter untersuchte: die Chloroplasten der Palisaden hatten sich von der abgekühlten Außenseite wegbegeben (Senn 1909). Auch über osmotaktische Bewegungen berichten Senn sowie Küster (1906), doch verdienen diese Angaben noch Nachuntersuchung. Wichtiger sind die chemotaktischen Reaktionen. Die Chloroplasten von Funaria werden durch Kohlensäure, durch Sulfate, durch Aepfelsäure, Asparagin, Lävulose und Dextrose, nicht aber durch Rohrzucker sehr lebhaft angelockt. Wie schon oben angedeutet, sucht Senn die charakteristischen Nachtstellungen der Chloroplasten auf Chemotaxis durch in den Zellwänden wirkende Stoffe zurückzuführen; es fehlt aber der Beweis, daß solche Stoffe wirklich in den Wänden vorhanden sind, wozu sich der fernere Nachweis gesellen müßte, daß sie in den Zellen selbst fehlen oder wenigstens in geringerer Konzentration gegeben sind, als in den Wänden.

2b) Zellkern. Bei Zellkernen ist schon vor längerer Zeit eine Lageveränderung nach Verwundung durch Tangl festgestellt worden. Diese Traumatotaxis beobachtet man am besten, wenn man in Epidermiszellen der Zwiebel einen Schnitt oder einen Einstich macht. Einige Stunden darauf bemerkt man in den unmittelbar an die Wunde anstoßenden Zellen eine lebhafte Protoplasmabewegung, durch die der Kern zu der an die Wunde angrenzenden Zellwand geführt wird. Eine Zeitlang findet sich daselbst auch eine lebhafte Plasmaansammlung. Die weitergehende Plasmabewegung führt aber den Kern schließlich wieder an seine normale Stelle in der Mitte der Zelle zurück. Die Reaktion beschränkt sich indes nicht auf die unmittelbar der Wunde benachbarten Zellen, sondern sie breitet sich allmählich auch auf entferntere Zellen aus.

Dasselbe Objekt, von dem soeben bei der Traumatotaxis des Zellkernes die Rede war, die Epidermis der Zwiebelschale von Allium Cepa, eignet sich auch zum Nachweis der Chemotaxis (Ritter 1910). Bringt man auf eine begrenzte Partie dieser Zellen verdünnte Lösungen gewisser Stoffe, so tritt eine ähnliche Kernverlagerung ein wie nach traumatischer Reizung, d. h. die Kerne bewegen sich, sowohl in den an den Reizstoff angrenzenden Zellen, wie auch in gewisser Entfernung von ihnen in der Richtung auf den Stoff zu. Dabei verdient besonders hervorgehoben zu werden, daß die Reizstoffe nicht etwa zum Tod gewisser Zellen und somit zu traumatotaktischer Reizung führen. Als chemotaktisch wirksam erwiesen sich sehr viele Salze, Basen, organische Säuren sowie Kohlenhydrate. Unwirksam sind anorganische Säuren und viele organische Substanzen verschiedenster Zusammensetzung. — Die chemotaktische Verlagerung des Zellkernes erfolgt langsamer als die traumatotaktische und es fehlt bei ihr die sichtbare Plasmabewegung. Es läßt sich aber zur Zeit nicht sagen, ob hier die Kerne wirklich aktiv wandern, wie das von den Chloroplasten vermutet wurde. Schließlich ist auch bei der Traumatotaxis nur eine Gleichzeitigkeit von Protoplasmabewegung und Kernverlagerung festgestellt; es könnte sich also auch um zwei Vorgänge handeln, die direkt nichts miteinander zu tun haben.

In einer Beziehung unterscheiden sich die Bewegungen des Zellkernes von den typischen taktischen Bewegungen. Es kommt nicht wie dort zu einer länger dauernden Ansammlung an der Stelle des Reizeintrittes, sondern die Kerne begeben sich nur für ganz kurze Zeit an die Reizstelle, um sofort wieder wegzuwandern. Es ist nicht wahrscheinlich, daß dies damit zusammenhängt, daß nun der einseitige Reiz durch Diffusion des Reizmittels in der Zelle aufgehoben ist.

Zum Schluß sei noch bemerkt, daß die chemotaktische Reaktion der Zellkerne als Kriterium dafür dienen kann, daß sehr viele Stoffe in das Protoplasma eindringen. Da man aber auch durch Wurzelhaare, Pilz-

fäden, die man auf einer Epidermis hinwachsen läßt, chemotaktische Reizung erzielt, so zeigt das, daß aus diesen lebenden Zellen auch Stoffe exosmieren, deren nähere chemische Charakterisierung auf diesem Wege freilich nicht möglich ist.

2c) Das Protoplasma. Taktische Bewegungen des Protoplasmas scheinen systematisch nicht studiert zu sein. Nur gelegentlich ist von einseitigen Protoplasmaansammlungen die Rede, so z. B. bei der Traumatotaxis. Weiter hat Němec solche Ansammlungen bei geotropischer Reizung der Wurzeln beobachtet. Wieweit es sich um Reizbewegungen handelt, muß erst festgestellt werden.

Eine Art von phototaktischer Reaktion liegt vielleicht bei der Einstellung der Kernspindel in die Richtung des Lichtes vor, die dann die Ausbildung der Scheidewand senkrecht zu den Lichtstrahlen zur Folge hat; das wurde durch Stahl (1885) für die keimenden Sporen von Equisetum festgestellt.

Literatur. **Aderhold**, *Jen. Ztschr. f. Naturw. 22, 310. 1888.* — **Åkerman**, *Ztschr. f. Bot. 2, 94. 1910.* — **Buller**, *Annals of Botany. 14, 543. 1900.* — **Chmielewsky**, *Beih. 16, 53. 1904.* — **Clifford**, *Annals of Bot. 11, 179. 1897.* — **Engelmann**, *Pflügers Archiv. 29, 387. 1882.* — **Frank**, *Bot. Ztg. 1904.* — **Hoyt**, *Botan. Gaz. 49, 340. 1910.* — **Jennings**, *Das Verhalten der niederen Organismen. Deutsch von Mangold. Leipzig 1910.* — **Jost**, *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Jena 1908.* — **Kniep**, *Jahrb. wiss. Bot. 43, 215. 1906.* — **Kusano**, *Journal Coll. Agric. Tokyo. 2, 1. 1909.* — **Küster**, *Ber. botan. Ges. 24, 255, 1906.* — **Lidfors**, *Jahrb. wiss. Bot. 41, 65. 1905.* — **Massart**, *Bullet. Acad. Belgique 3. Sér. 22, 148. 1891.* — **F. Müller**, *Jahrb. wiss. Bot. 49, 421. 1911.* — **Němec**, *Reizleitung und reizleitende Strukturen. Jena 1901.* — **F. Oltmanns**, *Flora. 75, 183. 1892.* — **Pfeffer**, *Unters. bot. Inst. Tübingen. 1, 363. 1884.* — **Derselbe**, *Ebenda. 2, 582. 1888.* — **Derselbe**, *Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Band 2. Leipzig 1904.* — **Pringsheim**, *Die Reizbewegungen der Pflanzen. Berlin 1912.* — **Richter**, *Sitzungsber. Wien. Akad. (I.) 115, 27. 1906.* — **Ritter**, *Z. f. Bot. 3, 1. 1911.* — **Rothert**, *Flora. 88, 371. 1901.* — **Derselbe**, *Jahrb. 391. 1903.* — **Schimper**, *Jahrb. wiss. Bot. 16, 1. 1885.* — **Senn**, *Gestalts- und Lageveränderung der Pflanzenchromatophoren. Leipzig 1908.* — **Derselbe**, *Ber. bot. Ges. 27, (12.) 1909.* — **Shibata**, *Jahrb. wiss. Bot. 49, 1. 1911.* — **Stahl**, *Bot. Ztg. 42, 145. 1884.* — **Derselbe**, *Berichte bot. Ges. 3, 334. 1885.* — **Stange**, *Bot. Ztg. 48, 107. 1890.* — **Strasburger**, *Wirkung des Lichts und der Wärme auf Schwärmsporen. Jena 1878.* — **Tangl**, *Sitzungsberichte Wiener Akad. 90, 1, 10. 1884.* — **Verworn**, *Allg. Physiologie. 5. Aufl. 1909.*

L. Jost.

III. Tropismen.

1. Begriffsbestimmungen. 2. Verschiedene Arten der Tropismen. a) Phototropismus. b) Elektrotropismus. c) Thermotropismus. d) Geotropismus. e) Haptotropismus. f) Rheotropismus. g) Traumatotropismus. h) Kamptotropismus. i) Osmotropismus. k) Chemotropismus. α) Hydrotropismus. β) Aerotropismus. γ) Chemotropismus im engeren Sinne. l) Galvanotropismus. m) Autotropismus. 3. Die tropistischen Perzeptionsvorgänge. a) Allgemeines. b) Lokalisation der tropistischen Perzeption. c) Zahl der verschiedenen Perzeptionsarten. d) Mechanismus der tropistischen Perzeptionsvorgänge. e) Besondere Einrichtungen zur Perzeption tropistischer Reize: Sinnesorgane. 4. Die tropistischen Reiztransmissionen. a) Allgemeines. b) Verbreitung. α) Phototropismus. β) Geotropismus. γ) Haptotropismus. δ) Rheotropismus. ε) Traumatotropismus. ζ) Kamptotropismus. η) Chemotropismus. ϑ) Galvanotropismus. c) Länge des Transmissionsweges. d) Mechanismus der tropistischen Transmissionen. e) Geschwindigkeit der tropistischen Reizleitungsvorgänge. 5. Die tropistischen Reaktionen. 6. Abhängigkeit der Tropismen von den Außenverhältnissen. a) Allgemeines. b) Verschiedene Beeinflussung der Tropismen eines Organes durch die Außenumstände. c) Verschiedene Beeinflussung der einzelnen Teile der Reizvorgänge durch die Außenumstände. d) Quantitative Abhängigkeit der Teilprozesse der Tropismen von der Variation der Außenfaktoren. e) Umschaltungen von Tropismen durch Außenumstände. f) Sonstige bemerkenswerte Beeinflussungen von Tropismen durch äußere Faktoren. 7. Gegeneinanderwirken zweier tropistischer Reizvorgänge. a) Allgemeines. b) Gegeneinanderwirken zweier gleicher Tropismen. c) Gegeneinanderwirken zweier verschiedener Tropismen.

1. Begriffsbestimmungen. Als Typus tropistischer Krümmungsbewegungen kann man etwa die Reizbewegungen festgewachsener Pflanzen ansehen, die unter der Einwirkung einseitig einfallenden Lichtes eintreten und die man Photo- (weniger zweckmäßig Helio-)tropismus nennt. Solche Reizbewegungen kommen häufig an Zimmerpflanzen vor, die nur vom Fenster her Licht empfangen: Der Gipfel des Hauptsprosses und die Seitensprosse haben sich dann wohl gegen die Lichtquelle hingebogen, die Blätter sich senkrecht gegen die Richtung des einfallenden Lichtes eingestellt. Dreht man die Pflanzen so um, daß die Lichtseite zur beschatteten Seite wird, so dauert es oft nur wenige Tage, bis sich die Zweigspitzen wieder zum Fenster hin gekrümmt, die Blätter sich wieder senkrecht zum Lichteinfalle eingestellt haben.

Besser geeignet für eine eingehendere Untersuchung des Phototropismus sind Keimpflanzen, z. B. von Hafer, Gerste, Hirse, Senf, Erbsen u. a. Sorgt man dabei etwa durch Kultur in wässeriger Nährlösung dafür,

daß auch die Keimwurzel einseitig von Licht getroffen wird, so kann man, z. B. bei Sinapis alba, wohl auch beobachten, daß sich die Wurzel vom Lichte weg krümmt, während der Keimstengel bemüht ist, sich mehr oder weniger genau in die Richtung der einfallenden Lichtstrahlen dem Lichte entgegen einzustellen (Fig. 1). Letzteren

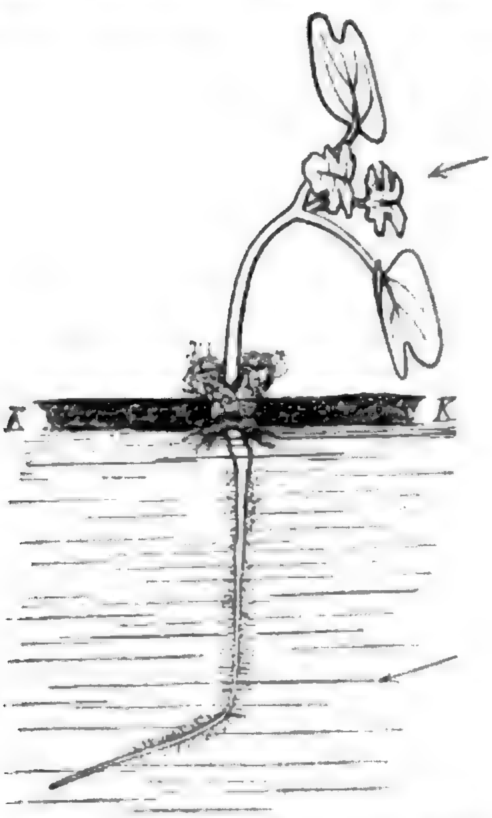


Fig. 1. Keimpflanze von Sinapis alba in Wasserkultur. K Korkplatte als Schwimmer. Die Pfeile markieren den Lichteinfall. Der Keimsproß ist positiv, die Wurzel negativ heliotropisch. Aus dem „Bonner Lehrbuch".

Vorgang nennt man positiven Phototropismus, die entgegengerichtete Bewegung der Wurzel negativen Phototropismus. Eigenartig und nicht stets gleich verhalten sich die Blätter: wo sie nicht schon durch den positiven Phototropismus der Stengel senkrecht gegen das einfallende Licht eingestellt werden, kommt diese Einstellung vielfach durch positiven Phototropismus der Blattstiele zustande (z. B. Tropaeolum). Sehr oft aber verhalten sich die Blätter, wie es scheint, ganz anders: die Wachstumszone des Blattstieles oder, wo dieser fehlt, der Blattbasis krümmt sich nicht so lange, bis sie den Lichtstrahlen parallel geworden ist, sondern nur so lange, bis sie dazu annähernd senkrecht steht. Wie das Blatt auch orientiert sein mag, immer sucht die Bewegungszone die Blattspreite senkrecht zum Lichteinfalle zu orientieren. Daraus wird ersichtlich, daß wir neben dem positiven und negativen Phototropismus noch eine dritte davon verschiedene Orientierungsbewegung vorfinden: den Transversal- oder Diaphototropismus. Dazu gesellt sich nun, wiederum bei den Blättern, häufig noch eine vierte Reaktionsart, die ebenfalls zum Ziele hat, die Blattflächen senkrecht gegen die Lichtstrahlen zu stellen. Sie unterscheidet sich von den bisher betrachteten Reizbewegungen ganz wesentlich dadurch, daß die Einstellung nicht durch eine Krümmung, sondern durch eine Drehung des reagierenden Organes und zwar um seine eigene Längsachse bewirkt wird. Man kann sie als Phototorsion (oder Phototortismus, Photostrophismus), genauer noch als Transversalphototorsion bezeichnen, weil sie das betreffende Organ transversal zu stellen sucht. Positiver Tropismus, negativer Tropismus, Transversal-(Dia-)tropismus und Torsion (Tortismus, Strophismus), das sind die vier Reaktionsarten, die Teilen festgewachsener Pflanzen zu Gebote stehen, um sich durch Richtungsbewegungen im Raume zu orientieren. Auch die vierte Reaktionsform, die Torsionen, pflegt man unter den Tropismen zu behandeln. Nach Sachs' Vorgange kann man Organe, die gleiches Reaktionsvermögen zeigen, als isotrop, solche, die verschieden reagieren, als anisotrop bezeichnen („Anisotropie" ist meist charakteristisch für die verschiedenen Organe einer Pflanze). Nicht nur gegenüber einseitig einfallendem Lichte kommen alle vier Arten Richtungsbewegungen zur Geltung. Es gibt nämlich neben dem Phototropismus noch viele andere Tropismen, die man wie diesen nach den jeweilig wirksamen Reizanlässen benennt.

2. Verschiedene Arten der Tropismen.

2a) Phototropismus. Er ist einer der allerauffälligsten und weit verbreitetsten Tropismen. Fast alle grünen Pflanzen lassen ihn in geringerem oder höherem Grade erkennen. Davon kann man sich überall, wo die Beleuchtungsverhältnisse mehr oder weniger einseitig sind, z. B. in Zimmern, Gewächshäusern, am Waldrande, an Hecken, Mauern, Felsen und Höhlen, am besten aber durchs Experiment überzeugen.

α) Arten des Phototropismus. In der Regel sind die normalerweise senkrecht nach oben wachsenden Stengel, die man orthotrop oder parallelotrop[1]) nennt, bei gewöhn-

[1]) Als Orthotrop oder parallelotrop bezeichnet man alle Pflanzenorgane, die unter normalen Verhältnissen in der Senkrechten, nach aufwärts oder abwärts, wachsen. Plagiotrop nennt man demgegenüber die Gebilde, die unter einem kleineren oder größeren Winkel schräg oder senkrecht zur Lotrechten wachsen. Orthotroper und

lichen Beleuchtungsverhältnissen positiv phototropisch. Das gleiche gilt von vielen plagiotropen Zweigen und manchen Blattstielen.

Dorsiventrale Organe, d. h. solche, die eine morphologische Ober- und Unterseite unterscheiden lassen, wie die meisten Blätter, viele Zweige, die Thalli von Moosen, sind mehr oder weniger transversal phototropisch: Die Ruhelage kann senkrecht (Dia- oder Transversaltropismus) oder mehr oder weniger schräg (wohl auch „Klinotropismus" genannt) sein. Offenbar gibt es alle Uebergänge zwischen positivem, transversalem und negativem Phototropismus. Bei flächenförmig ausgebildeten dorsiventralen Organen (vor allem bei Blättern) kann die Endstellung, die durch Krümmungen, durch Torsionen oder durch beides angenommen wird, besonders verschieden ausfallen. Ohne auf Einzelheiten eingehen zu wollen, sei bloß hervorgehoben, daß hier eine Schräg- oder gar Parallelstellung (Profilstellung) zum Lichteinfalle auf zweierlei Weise erreicht werden kann: einmal dadurch, daß die Medianebene der Strahlenrichtung parallel bleibt, die Längsachse des Blattes sich aber schräg oder parallel zum Lichteinfalle stellt (diese Reaktion wäre also eine typisch dia- oder besser klinotropische), oder daß die Medianebene durch Torsion des Stieles schräg oder gar senkrecht zum Strahlengange sich einstellt, so daß das Blatt eine seiner Seitenkanten dem Lichte zukehrt. In diesem letzteren Falle redet man wohl von Paratropismus und spricht man von paraphototropischen Organen. Alle Bewegungsvorgänge an dorsiventralen Organen sind schwierig zu analysieren. Es beteiligen sich daran außer phototropischen oft noch andere tropistische, außerdem nastische Erscheinungen. Durch Umstimmungen verschiedener Art werden die Verhältnisse manchmal noch besonders kompliziert.

Die Wurzeln, die ja gewöhnlich nicht vom Licht getroffen werden, sind infolgedessen meist nicht oder nur schwach negativ (z. B. Lepidium sativum, Sinapis alba), selten schwach positiv (Allium sativum, Hyacinthus orientalis u. a.) phototropisch. Etwas ausgesprochener pflegt der negative Phototropismus bei Luftwurzeln von Aroideen, Orchideen und anderen Gewächsen ausgebildet zu sein.

Auch viele Algen sind phototropisch empfindlich.

Bei fast allen diesen Bewegungen fällt die Zweckmäßigkeit direkt ins Auge. Bekanntlich ist das Licht für die Ernährung der grünen Pflanzen von allergrößter Bedeutung. Alles kommt darauf an, die Assimilationsorgane, d. h. die Blätter oder Thallome, in möglichst günstige Lichtverhältnisse zu bringen. Wie könnte dies bei einseitiger Beleuchtung besser geschehen als durch die erwähnten Richtungsbewegungen der oberirdischen Organe?

Durch Laboratoriumsversuche kann man leicht feststellen, daß phototropische Krümmungen immer nur durch einseitiges Licht ausgelöst werden. Stellt man die Versuchspflanzen in die Mitte zwischen zwei gleich starke Lichtquellen, z. B. elektrische oder Gaslampen, oder besser noch sorgt man durch Rotation der Versuchspflanzen auf einem Drehwerk (Klinostat) dafür, daß das Licht mit gleicher Intensität auf alle Seiten fällt, so bleiben die phototropischen Krümmungen meist aus.

β) Lichtqualität. Zweifellos sind es die Lichtquellen selbst, die perzeptorisch wirken. Da das Sonnenlicht und ebenso das Licht der künstlichen Lichtstrahlen aber aus Strahlen ganz verschiedener Wellenlänge besteht, so ist festzustellen, ob alle diese Strahlen gleich wirksam sind. Die neuesten, methodisch vollkommensten Untersuchungen darüber verdanken wir Blaauw. Unter Berücksichtigung der Dispersion und der Energieverteilung im Prismenspektrum gelangte dieser Forscher bei den Keimblättern von Avena und den Sporangienträgern von Phycomyces zu dem Ergebnisse, daß alle sichtbaren Lichtstrahlen phototropisch wirksam sind, aber in ungleichem Maße. Die Empfindlichkeit ist nämlich für die schwächer brechbaren Strahlen verhältnismäßig gering. Sie nimmt dann nach der Seite der stärker brechbaren hin erst langsam, dann ziemlich plötzlich (bei Phycomyces an der Grenze zwischen Gelb und Grün, bei Avena an der zwischen Grün und Blau) sehr rasch zu, um schon vor dem Violett (bei Phycomyces im Blau, bei Avena im Indigo) ihr Maximum zu erreichen; im Violett ist sie wieder wesentlich geringer, etwa so groß wie in der dem Blau zugekehrten Hälfte des Grün. Bei Avena ist die Sensibilität bei 534 $\mu\mu$ etwa 2600 mal geringer als im Indigo bei $\pm$ 465 $\mu\mu$, wo sie am größten ist; bei 390 $\mu\mu$ nur noch halb so groß, im Ultraviolett bei 365 $\mu\mu$ nur noch $^1/_4$ so groß wie bei $\pm$ 465 $\mu\mu$. Bei Phycomyces ist die Empfindlichkeit im Orange (615 $\mu\mu$) ungefähr $^1/_{15}$ des Maximalwertes (bei 495 $\mu\mu$). Die abweichenden Angaben in der Literatur erklären sich aus der Anwendung weniger zweckmäßiger Untersuchungsmethoden. Die Gesichtsempfindung des menschlichen Auges für die verschiedenen Strahlen ergibt übrigens eine Kurve, die mit denen für Phycomyces und

plagiotroper Wuchs sind meist die Folge von Tropismen oder Nastieen oder des Zusammenwirkens beider Sorten von Bewegungen.

Avena große Aehnlichkeit hat. Entsprechende Kurven scheinen auch für viele anorganische photochemische Prozesse gültig zu sein.

Schon die Unterschiede im Kurvenverlaufe bei Phycomyces und Avena weisen mit Bestimmtheit darauf hin, daß sich nicht alle Pflanzen ganz gleich verhalten. Vielleicht also gibt es Objekte, bei denen die Empfindlichkeiten gegen die verschiedenartigen Strahlen ganz anderen Kurven folgen, wie es ja bei der Phototaxis sicher der Fall ist. Darauf scheinen ältere Literaturangaben hinzudeuten. So soll z. B. kein großer Unterschied in der Reaktionsgeschwindigkeit bei den Perithecienträgern von Claviceps microcephala und den Sporangienträgern von Pilobolus crystallinus bestehen, die sich in orangenem (hinter Kalibichromatlösung) und in violettblauem (hinter Kupferoxydammoniaklösung) Lichte krümmen (G. Kraus und Brefeld).

Nach Wiesner sind etwas wirksam bei manchen Objekten auch die unsichtbaren ultraroten Strahlen.

Will man in Versuchen irgendwelcher Art störende Lichtwirkungen ausschließen, ohne auf Belichtung ganz verzichten zu können, so bringt man die Versuchspflanzen am besten in rotes Licht, das eine Lösung von Safranin passiert hat. Ob der Druck der Lichtstrahlen bei der Perzeption Bedeutung hat, ist ganz unbekannt.

γ) Zeitlicher Verlauf. Wie jeder Vorgang so bedürfen auch die tropistischen Reizvorgänge Zeit zu ihrem Ablaufe: Der gesamte Prozeß vom Beginne der Reizung an bis zum Ende der Reizbewegung dehnt sich über einen kleineren oder größeren Zeitraum aus. Dann tritt eine Ruhepause ein, worauf gegebenenfalls eine Ausgleichsbewegung einsetzt.

Meist dauert es einige bis viele Minuten, bis die phototropische Reaktion beginnt (Reaktionszeit), und viele Minuten oder Stunden, bis der Reizvorgang nach Beginn der Reizung beendigt ist. Größere Geschwindigkeit hätte keinen „Zweck", ja wäre sogar schädlich.

Die Reaktions- oder Krümmungszeit ist selbst bei außerordentlich schnell nach der Reizung beginnenden Reaktionen, wie der Zuckung des Muskels, den seismonastischen Bewegungen von Mimosa, den tropistischen Reizkrümmungen der Ranken so auffällig, daß man sich wahrhaft über die neuesten Bestrebungen mancher Forscher wundern muß, wegzuleugnen, daß es bei den so viel langsamer ablaufenden phototropischen (oder geotropischen) Bewegungen überhaupt eine Reaktionszeit gibt. Schon die rein theoretischen Erwägungen, daß dem Reaktionsvorgange die Perzeption, meist auch eine Reizleitung vorausgehen muß, lauter Vorgänge, die doch auch Zeit brauchen, nötigt zu der Annahme, daß zwischen dem Reizungsbeginne und dem Reaktionsbeginne ein Latenzstadium verstreichen muß. Und zweifellos dauert dieses Latenzstadium im allgemeinen um so länger, je langsamer der ganze Reizvorgang abläuft. Zweifel über das Vorhandensein einer Reaktionszeit konnten wohl nur deshalb entstehen, weil es methodisch oft schwer ist, die Reaktionszeiten exakt zu bestimmen. Einmal nämlich sind die individuellen Differenzen zwischen den einzelnen Exemplaren der verwendeten Organe sehr groß, teils in Abhängigkeit von Außeneinflüssen, die sich noch gar nicht genau ermitteln lassen, teils abhängig vom inneren und ebenfalls noch völlig unbekannten Zustande der Objekte. Dann aber werden verschiedene Werte erhalten, je nach der Genauigkeit, mit der man den Reaktionsbeginn ermittelt. Denn die Krümmung beginnt sehr langsam und ist zunächst kaum merklich! Dazu kommen endlich Beobachtungsfehler, die mit der Verfeinerung der Ablesungsmethoden und mit der Verminderung der Zahl der gleichzeitig gemessenen Versuchspflanzen ganz ungeheuer wachsen und die hauptsächlich durch störende, autonome Nutationen bedingt werden.

Die mikroskopische Beobachtung hat den Vorteil, schon die ersten feinen Ausschläge ablesen zu können, aber den Nachteil, auf Einzelindividuen beschränkt zu sein; die makroskopische hat gegenüber der geringeren Genauigkeit, die aber mit Rücksicht auf die autonomen Nutationen geradezu ein Vorzug ist, den Vorteil, daß man sehr viele Objekte in jedem Einzelversuche untersuchen kann und dadurch schnell und leicht zu brauchbaren Mittelwerten kommt. Welche Methode man auch anwenden mag, Hauptsache ist nur, daß man bei vergleichenden Versuchen und bei einer Analyse des Wesens der verschiedenen oben genannten Zeiten stets eine und dieselbe Methode benutzt, sonst wird man nie dazu kommen, zwischen diesen Zeiten etwa bestehende Gesetzmäßigkeiten aufzufinden. Ein Anfang dazu ist aber durch solche konsequente Anwendung der makroskopischen Methode bereits gemacht.

Die Reaktionszeit hat nur innerhalb sehr enger Grenzen mit der Größe des Perzeptionsvermögens eines Organes oder mit der Intensität des Reizanlasses etwas zu tun. Wenn auch die Stärke der Reizung unter gewissen Umständen in der Länge der Reaktionszeiten sich ausdrücken kann, so wissen wir, daß trotz sehr verschiedener Größe der Reizungen Reaktionszeiten bei ein- und demselben Organe doch gleich sein können. Die Reaktionszeit ist vielmehr, hauptsäch-

lich der Ausdruck des Reaktionsvermögens: Schneller als es in den Eigenschaften eines Organes begründet ist, kann die Krümmung eben bei noch so starker Reizung sich nicht entwickeln und beginnen.

Sieht man sich nun den Verlauf eines phototropischen Reizvorganges in der Zeit einmal genauer an, so erkennt man bald weitere bestimmte, wohl definierbare Zeitpunkte, die sich besonders scharf markieren und die ganz bestimmten Etappen im Ablaufe des Reizprozesses entsprechen. Der erste dieser Zeitpunkte entspricht dem äußeren Beginn des ganzen Prozesses: dem Beginne der Reizung durch den Reizanlaß. Dieser Zeitpunkt, Reizungsbeginn genannt, läßt sich mit der Uhr leicht genau ermitteln. Betrachtet man das gereizte Organ vom Reizungsbeginne an fortgesetzt, so beobachtet man stets ohne Ausnahme an allen Reizvorgängen bei Pflanzen und bei Tieren, also nicht bloß den phototropischen, daß zunächst der Reizanlaß ohne äußerlich sichtbare Wirkung bleibt. Dann beginnt die Krümmung langsam, wird schneller und schneller bis zu einem Geschwindigkeitsmaximum, um danach wieder langsamer und langsamer fortzuschreiten, bis sie ihr Ende erreicht. Diesen Zeitpunkt hat man bisher ebensowenig mit einem besonderen Terminus bezeichnet wie die Zeit, die für den ganzen Reaktionsvorgang vom Beginne der Krümmung bis zu ihrer Beendigung nötig ist. Hierauf tritt für kürzere oder längere Zeit Ruhe ein. Alsdann fängt, falls der Reizanlaß bald nach Reizungsbeginn entfernt wurde, die Rückkrümmung an, die nach längerer Zeit ihr Ende erreicht.

Mit diesen äußerlich schon erkennbaren Zeitpunkten ist indes der zeitliche Verlauf eines Reizvorganges theoretisch noch nicht genügend gekennzeichnet. Sahen wir doch früher schon, daß man jeden Reizvorgang auflösen muß in die Perzeptions-, die Transmissions- und die Reaktionsprozesse. Perzeption wie Transmission müssen natürlich während der Reaktionszeit wenigstens teilweise erfolgt sein, sonst könnte ja die Krümmung nicht einsetzen. In den Zeitraum der Reaktionszeit fallen also weitere, freilich zunächst nur theoretisch fixierbare Zeitpunkte, die für die Einsicht in den Ablauf des ganzen Reizvorganges von größter Wichtigkeit sind, so z. B. der Zeitpunkt, wo nach dem Reizungsbeginne die ersten Anfänge der Perzeption sich geltend machen (die Perzeptionszeit).

Zur Ermittelung der Perzeptionszeit, die den Zeitschwellenwert eines tropistischen Reizanlasses bildet, sind natürlich besondere Kunstgriffe in richtig geleiteten Versuchen nötig: Offenbar muß man untersuchen, ob eine Reizung von kürzerer Dauer, als die Reaktionszeit beträgt, auch noch eine Reaktion auszulösen vermag. Das ist nun tatsächlich der Fall: Auch kürzere Reizung zieht eine Reizkrümmung als Nachwirkung nach sich. Macht man die Reizung immer kürzer und kürzer, so tritt freilich schließlich der Fall ein, daß die Krümmung ausbleibt. Man hat den Zeitraum, während dessen man mindestens reizen muß, um eine Reaktion auszulösen, nach Czapek als Präsentationszeit (Induktionszeit) bezeichnet. Lange Zeit hielt man sie für die Perzeptionszeit, bis durch neue Variation der Versuchsmethodik der exakte Nachweis erbracht werden konnte, daß diese Annahme unrichtig, sondern daß die Perzeptionszeit noch sehr viel kleiner ist. Das ließ sich durch intermittierende Reizung an der Summation der Einzelreizeffekte feststellen. Für den Phototropismus hatte schon Romanes gezeigt, daß eine genügend große Zahl aufeinanderfolgender elektrischer Lichtblitze eine phototropische Krümmung zur Folge hat, ein Beweis dafür, daß selbst die kürzesten Lichtfunken, die man überhaupt methodisch herstellen kann, noch perzipiert werden.

Die vorliegenden Tatsachen machen es sehr wahrscheinlich, daß die Perzeptionszeit für einen Reizanlaß unmeßbar klein ist, daß also der Reizanlaß, fast in dem Momente, wo er das Plasma trifft, seine Wirkung schon ausübt. Daraus folgt aber nicht, daß man den Begriff der Perzeptionszeit fallen lassen müßte. Denn er ist einerseits logisch berechtigt, andererseits auch theoretisch nötig. Es läßt sich ja kaum denken, daß der Anlaß schon ganz genau in dem Augenblicke perzipiert wird, wo er das empfindliche Plasma erreicht, da dem Reizeingriff Widerstände sich entgegenstellen müssen.

Wenn auf einen einzelnen, nicht sehr grellen Lichtblitz, auf eine kurze Ablenkung aus der Ruhelage im allgemeinen keine Reizkrümmung als Antwort folgt, so liegt das lediglich daran, daß die Krümmungsreaktion erst durch viel stärkere Erregungen geweckt wird. Eine Reizreaktion wird nämlich erst dann ausgelöst, wenn der Reizanlaß viel längere Zeit als die Perzeptionszeit, eben die Präsentationszeit auf ein Organ eingewirkt hat.

So markieren sich also folgende Zeiträume vom Reizungsbeginne bis zur Beendigung der Reaktion zunächst ganz besonders: die Perzeptionszeit, d. i. die Zeitwelle, die Präsentationszeit, die Reaktionszeit. Sie bieten auch besonderes Interesse. Sie sind einzeln für sich und in ihren Beziehungen zueinander eingehend zu erforschen. Das wird aber nur möglich, wenn

man weitere Vorgänge von fundamentaler Wichtigkeit berücksichtigt, die bei der Vertiefung der Analyse der Reizvorgänge entdeckt wurden. Das sind die Summation und das Abklingen der „Erregungen". Reizt man ein Organ einmal etwas kürzere Zeit als die Präsentationszeit beträgt, so bleibt die Reaktion aus; reizt man dagegen zweimal oder dreimal in dieser Weise mit nicht allzu langen Unterbrechungen nacheinander, so reagiert das Organ. Der Versuch beweist erstens noch einmal schlagend, daß die Perzeptionszeit kürzer ist als die Präsentationszeit, zweitens, daß für sich unwirksame Reizungen sich summieren können.

Bei solcher intermittierender Reizung kommt es im wesentlichen nur auf die Zeitsumme an, während deren die Versuchspflanzen aus der normalen Ruhelage abgelenkt sind, vorausgesetzt, daß bei intermittierender Reizung die Ruhepausen zwischen den Einzelreizen nicht allzu lange, z. B. etwa so lange wie die Einzelreizungen, währen. Dieses seit langem für die subjektive Lichtempfindung des Menschen bei intermittierendem Lichte als Talbotsches Gesetz bekannte Gesetz, daß also entscheidend für die Erregung das Produkt aus Reizintensität und Reizdauer ist, ist danach auch für den Phototropismus von Nathansohn und Pringsheim durch die Kompensationsmethode als richtig erwiesen worden, und zwar selbst dann, wenn das Verhältnis der Licht- und Dunkelperiode, zwischen ½ und $^1/_{16}$ schwankte.

Das Ausbleiben einer Reaktion bei zu langen Ruhepausen zwischen den Einzelreizungen zeigt schließlich, daß der Erfolg einzelner Reizungen, die für sich zu schwach sind, um eine Reaktion auszulösen, nach einiger Zeit wieder soweit abklingt, daß eine wirksame Summation in einer Krümmung nicht mehr möglich ist. Auch der hierzu nötige Zeitraum läßt sich experimentell feststellen. Man hat ihn Relaxations- oder Abklangszeit genannt und das Verhältnis zwischen Relaxationszeit und Dauer des Einzelreizes als das Relaxationsverhältnis (Zielinski). Nicht also bloß die Reizkrümmungen werden nach einiger Zeit rückgängig gemacht, sondern ebenso auch die Perzeptions- usw. vorgänge, oder, wie man wohl auch etwas unklar sagt, die „Erregungen".

δ) Abhängigkeit von der Stärke der Reizung (Reizgröße). Die Intensität der phototropischen und anderen tropistischen Reizkrümmungen ist nun ebenso wie der Zeitpunkt ihres Beginnes und die Schnelligkeit ihres Ablaufes in hohem Maße von den Außenumständen abhängig. Unter ihnen ist von ganz besonderem Interesse die Reizgröße, die Stärke der Reizung. Was zunächst die geringste Lichtintensität betrifft, die überhaupt noch Krümmung auslöst (die Intensitätsschwelle), so hat sie Richter für etiolierte Keimlinge der Vicia villosa in reiner Luft zu 0,00000023 N. K. bestimmt. In Laboratoriumsluft ist sie noch viel niedriger, so daß sie nicht bestimmt werden konnte. Gleiches gilt für Vicia sativa in reiner und in Laboratoriumsluft. Solche niedrigen Schwellenwerte machen es begreiflich, daß sich manche Keimlinge phototropisch auch in dem schwachen Lichte krümmen, das von Leuchtbakterienkulturen ausgestrahlt wird (Molisch), oder in dem schwachen Phosphoreszenzlichte, das von manchen mineralischen Substanzen ausgeht.

Aber auch bei einer und derselben Intensität eines tropistisch wirkenden Außenfaktors ist die Schnelligkeit des Bewegungsbeginnes und die Intensität der Reaktion innerhalb gewisser Grenzen auch noch abhängig von der Dauer seiner Einwirkung: Die Krümmung nimmt weiter bedeutend an Intensität zu, wenn man länger reizt. Daraus ergibt sich eine enge Abhängigkeit der Stärke der Reizung von der Dauer der Einwirkung des Außenfaktors. Die Reaktion ist ja geradezu eine Folge davon, daß der Reizanlaß eine gewisse Zeit eingewirkt hat. Bei allen Tropismen scheint eine solche Beziehung zwischen der Stärke der Reaktion und der Dauer der Reizung zu bestehen, wenn es auch Reizvorgänge gibt, die, einmal ausgelöst, sogleich in ganzer Intensität in die Erscheinung treten, ganz unabhängig von der längeren Dauer der Reizung. Die Tierphysiologie bezeichnet diesen Typus als den „Alles oder Nichts". Vielleicht gehören unter gewissen Bedingungen einige seismonastische Bewegungen der Pflanzen hierher.

Eine wichtige Aufgabe der Reizphysiologie ist es natürlich, festzustellen, ob und welche Gesetzmäßigkeiten es gibt für diese Abhängigkeit des Reizvorganges von der Dauer eines Reizanlasses und seiner Intensität.

Fröschel und gleichzeitig Blaauw fanden, daß die phototropische Präsentationszeiten aufs engste abhängig sind von der Lichtstärke. Dabei konnte die phototropische Präsentationszeit bis auf $^1/_{2000}$ Sekunde sinken. Sie erhielten für die Präsentationszeiten eine charakteristische Kurve (Hyperbel). Sie analysierten die Kurve und erkannten, daß für alle Präsentationszeiten die Produkte der zur Reizung verwendeten Lichtstärken und der Lichtdauern eine bestimmte, nämlich konstante

Größe hatten. Dieses Produkt drückt aber nichts anderes aus als die zugeführte Lichtmenge. So erhielten sie das wichtigste Ergebnis, das dann auch für den Geotropismus durch Pekelharing und Maillefer als richtig erwiesen wurde: Entscheidend für die Krümmungsschwelle ist innerhalb gewisser Grenzen die Zufuhr einer bestimmten Reizmenge (Produkt aus Anlaß × Expositionszeit).

ε) Abstumpfung durch Belichtung. Eine Tatsache von großer Bedeutung ist es, daß bei vielen Tropismen, so auch beim Phototropismus, ein Organ nicht schlechthin positiv oder negativ reagiert, sondern bald positiv, bald negativ je nach der Intensität der Reizung. Den entscheidenden Versuch in dieser Hinsicht machte bereits Müller 1872. Als er durch eine Sammellinse konzentriertes Sonnenlicht auf Keimlinge von Lepidium sativum fallen ließ, erhielt er dicht hinter der Linse negative, etwas weiter davon entfernt keine, noch weiter entfernt aber positive Krümmungen. Berthold, Stahl und namentlich Oltmanns stellten Gleiches auch für Algen und Pilze, Linsbauer und Vouk beachtenswerterweise auch für einige Keimlingswurzeln fest (Raphanus, Sinapis). So fand Oltmanns bei Belichtung mit elektrischem Bogenlichte die Sporangienträger von Phycomyces eine Stunde nach Versuchsbeginne bis zu 60 bis 70 cm von der Lichtquelle negativ, in diese Entfernung „indifferent", darüber hinaus positiv. In 20 bis 30 cm betrug die Lichtintensität ca. 100000 Meterkerzen.

Während man früher wohl dachte, die Art der Reaktion, ob positiv oder negativ, werde beim Phototropismus von der Lichtintensität bestimmt, hat Blaauw gezeigt, daß Richtung und Intensität der Krümmung von den zugeführten Lichtmengen abhängen. Dementsprechend kann bei jeder Lichtintensität positiver Phototropismus ausgelöst werden, vorausgesetzt eben, daß man die Belichtungszeit entsprechend wählt. Führt man also z. B. vorher nicht belichteten Sporangienträgern von Phycomyces Licht zu, so wird die Präsentationszeit bei 100 bis 150 Meterkerzen × Sekunden erreicht (Reaktionszeit 20 bis 25 Min.). Zwischen 800 bis 1500 Meterkerzen/Sekunden tritt positive Krümmung in maximaler Stärke ein mit einer Reaktionszeit von 15 Min. Bei 3000 Meterkerzen/Sekunden wird die Reaktionszeit bereits wieder auf 20 Min., bei 22000 Meterkerzen/Sekunden auf 32 Min. verlängert. Bei 100000 bis 200000 Meterkerzen/Sekunden bleibt die Krümmung aus, bei mehr als 200000 Meterkerzen/Sekunden tritt negative Reaktion ein, die bei 4 bis 12 Mill. Meterkerzen/Sekunden kräftig wird.

Für den Phototropismus machte dann Oltmanns die weitere sehr wichtige Entdeckung, daß die Richtung der Reaktion, ob positiv oder negativ, nicht allein von spezifischen Besonderheiten der betreffenden Pflanze und von der einseitig zugeführten Lichtmenge abhängt, sondern in hohem Maße auch durch die vorausgegangene Belichtung bestimmt wird. Als er Phycomyceskulturen miteinander verglich, von denen die einen im Dunkeln gestanden hatten, die anderen schon belichtet worden waren, erhielt er bei den Dunkelpflanzen noch in solchen Lichtintensitäten negative Krümmungen, in denen sich die Lichtpflanzen positiv krümmten. Belichtung also verändert den Zustand so, daß sie gegen das Licht gewissermaßen abstumpft. Das sieht man sehr schön bei länger fortgesetzter einseitiger Belichtung von Dunkelkulturen: Sporangienträger, die sich bei Versuchsbeginn negativ krümmten, werden nach einigen Stunden gerade oder gar positiv gekrümmt. Recht unklar nennt man das: „die Lichtstimmung nimmt zu". Das Licht hat also mindestens eine doppelte Wirkung: einmal eine phototropische (und zwar positiv und negativ tropistische), dann auch eine abstumpfende. Daß beide Wirkungen nicht identisch sind, konnte Pringsheim sehr schön bei Keimlingen von Panicum feststellen. Während hier nur die Koleoptile (das Keimblatt) den phototropischen Reiz perzipiert, genügt Belichtung des „phototropisch nicht empfindlichen" Keimstengels schon, um die Stimmung zu ändern. Und zwar ist diese stimmungsändernde Wirkung ebenso groß wie bei ausschließlicher Belichtung des Keimblattes, woraus ersichtlich, daß das Licht abstumpfend nicht bloß lokal, auf die Koleoptile, wirkt (vgl. auch van der Wolk für die Keimblätter von Avena).

Sonach bedurfte die abstumpfende Wirkung des Lichtes einer Sonderuntersuchung. Sie macht sich überhaupt in einer geringeren Lichtempfindlichkeit allseits oder einseits belichteter Pflanzen gegenüber Dunkelpflanzen geltend. Sie äußert sich demnach bei Lichtpflanzen gegenüber diesen in einer Verlängerung der Präsentationszeiten (also in einer Erhöhung der Reaktionsschwelle), sowie in der Erhöhung derjenigen Lichtmengen, bei denen das Optimum der positiven Reaktion und die Indifferenz sowie der Umschlag in die negative Reaktion eintritt. Ihr Maß wird nicht bestimmt schlechthin durch die vorübergehend zugeführte Reizmenge, sondern durch die Reizmenge, die dauernd zugeführt wird, d. h. aber durch die Lichtintensität, der die Versuchs-

pflanzen längere Zeit ausgesetzt sind. Sie ist gewissermaßen eine Einstellung der Pflanze in einen Gleichgewichtszustand, der einer bestimmten, stationären Energiezufuhr entspricht. Um in diesem Zustande die Pflanze phototropisch zu reizen, braucht man eben eine größere Energiezufuhr als für eine Dunkelpflanze, für die schon die geringste Energiemenge eine bedeutende Aenderung des der Dunkelheit entsprechenden Gleichgewichtszustandes bedeutet (Blaauw). Die Abstumpfung scheint bei verschiedenen Objekten verschieden weit zu gehen. Nicht immer ist sie so groß, daß die negativen Reaktionen wieder in positive verwandelt werden; so reagieren z. B. Wurzeln bei Belichtung mit mittelstarkem Lichte immer negativ, in schwachem Lichte dagegen nach Linsbauer und Vouk positiv.

Für die Intensitätszunahme der Abstumpfung ist aber zweifellos die vorübergehend zugeführte Reizmenge nicht gleichgültig.

Auch über den zeitlichen Verlauf der Abstumpfung sind wir bereits leidlich unterrichtet. Nach Pringsheims Beobachtungen nimmt sie bei Belichtung von Dunkelpflanzen zunächst schnell, dann immer langsamer zu, bis die „Stimmung" bei Dauerbelichtung mit konstanten Lichtintensitäten schließlich, manchmal schon nach 20 Minuten, konstant wird. Die Abstumpfung der Empfindlichkeit durch Belichtung erfolgt auch schneller als die Erhöhung der Sensibilität nach Verdunkelung.

Die Abstumpfungsvorgänge sind auch deshalb interessant, weil sie, wie wir jetzt wissen, schon recht kurze Zeit nach Belichtungsbeginn und zwar bei Reizung mit sehr geringen Lichtmengen an Dunkelpflanzen so ausgesprochen werden können, daß sie die durch noch kleinere Lichtmengen induzierten, positiv phototropischen Krümmungen vollkommen aufheben. Darüber haben uns erst die Untersuchungen über die phototropischen Präsentationszeiten belehrt, die wir Pringsheim, Blaauw und Fröschel verdanken. Diese abstumpfende Wirkung sehr geringer Lichtmengen ist so groß, daß man bisher die durch noch kleinere Lichtmengen induzierten positiven Reaktionen der Dunkelpflanzen völlig übersehen und infolgedessen die phototropische Reaktionsbefähigung bedeutend unterschätzt hatte. Die erwähnten Forscher machten nämlich die interessante Entdeckung, daß bei Keimlingen, die in Dunkelheit gekeimt sind (nämlich nach Pringsheim von Avena, Hordeum, Panicum und Brassica, dagegen nicht von Secale, Agrostemma und Lepidium), bereits überraschend kurze Belichtung mit sehr schwachem Lichte (z. B. 1 Sek. lang mit 0,0067 B.-R.-Lichteinheiten) sehr starke positive phototropische Krümmungen durch Nachwirkung auslösen kann, Belichtung von längerer als Präsentationszeitdauer den phototropischen Effekt abschwächt, schließlich aufhebt, eventuell auch in einen schwach negativen verwandelt (Pringsheim), worauf dann noch längere Belichtung wieder positiv phototropische Krümmung veranlaßt. Daß es sich bei diesen Veränderungen der tropistischen Reaktionen tatsächlich um die Abstumpfung handelt, hat Pringsheim gezeigt. Auch allseitige entsprechend kurze Vorbelichtung oder Nachbelichtung mit gleich schwachen Lichtintensitäten wirkt nämlich auf eine positive Krümmungsreaktion abstumpfend, die durch vorübergehenden einseitigen Einfall schwachen Lichtes induziert ist.

Man sieht aus allen Versuchen, über die ich in diesem Abschnitte bisher berichtet habe, ganz deutlich: der phototropische Effekt hängt nicht schlechthin ab von der zugeführten Lichtmenge, sondern auch von der Art und Weise, wie das Licht zeitlich verteilt ist. Eine und dieselbe Lichtmenge als Produkt von hoher Intensität und kurzer Wirkungsdauer kann vielleicht starke positive Reaktion auslösen, dagegen als Produkt geringerer Intensität und längerer Wirkungsdauer indifferent sein. Mit anderen Worten: starkes Licht, das kurze Zeit wirkt, hat andere Folgen als schwaches Licht, das längere Zeit wirkt. Entscheidend ist also nicht die Reizmenge, sondern die Reizintensität. So versteht man auch die Angabe Pringsheims, nicht alle Lichtintensitäten hätten die Eigenschaft, nach kurzer Einwirkung eine Indifferenz zu veranlassen: in Entfernungen, die 200 cm von seiner Auer- oder Nernstlampe überschritten, blieb sie aus.

Ferner sieht man, daß es für die Dunkelpflanzen mehrere phototropische Präsentationszeitgruppen für gleiche Lichtintensitäten, aber für verschiedene Reizdauern und damit verschiedene Reizmengen gibt: eine erste Gruppe für sehr kurze Reizdauern (man kann sie die Präsentationszeiten der Dunkelpflanzen nennen) und mehrere weitere Gruppen für längere Reizdauern (durch Licht modifizierte Präsentationszeiten). Natürlich müssen diesen Präsentationszeiten auch verschiedene Reaktionszeitgruppen entsprechen, einmal die Reaktionszeiten der Dunkelpflanzen, dann die durch Licht modifizierten Reaktionszeiten. Während die durch Licht modifizierten Präsentationszeiten durchgängig länger sind als die Präsentationszeiten der Dunkelpflanzen, scheinen nach Pringsheims Beobachtungen die durch Licht modifizierten Reaktionszeiten auch kürzer sein zu können als die Reaktionszeiten der Dunkelpflanzen. Woran das liegt, wäre genauerer Analyse wert.

Daß gleiche Reizmengen verschieden wirken können, je nach der Verteilung des Lichtes über die Zeit, das hängt offenbar, darüber sind sich die Forscher, die sich zuletzt mit diesen Problemen beschäftigt haben, einig, damit zusammen, daß das Licht zum mindesten drei Wirkungen hat: eine positiv phototropische, eine negativ phototropische (vielleicht aber auch eine transversal phototropische?) und außerdem eine abstumpfende und daß die letzte auch schon von Belichtungsbeginn an sich geltend macht, die phototropische Reaktionsart bestimmend. Pringsheim erklärt die Indifferenz usw. so: Reizt man nur wenig länger, als die Präsentationszeiten der Dunkelpflanzen dauern, so entspricht der geringen Erregung positive Reaktion; reizt man länger, so wächst die Erregung und damit setzen negative Tendenzen ein (oder setzt zunächst Transversalphototropismus ein?), die auf einen Ausgleich der positiven Krümmung hinstreben. Folge einer gewissen Erregungshöhe muß alsdann Indifferenz sein, noch größerer Erregung negative Reaktion. Ist dagegen das Licht nicht so intensiv, so kann die phototropische Erregung nicht auf diese Höhe steigen, bevor die Abstumpfung, die zugleich durch das Licht, also durch die Zunahme der photischen Erregung bewirkt wird, sich ausgesprochen geltend macht. Dann aber wirkt die Abstumpfung so stimmungsändernd, daß die phototropische Erregung nun herabgedrückt wird auf ein Maß, dem positive Reaktion entspricht. Kompliziert werden die Verhältnisse nun dadurch, daß die drei in Betracht gezogenen Lichtwirkungen mit Zunahme der Reizung und mit Verlängerung der Belichtungsdauern sich in ungleichem Maße verändern, in einem Verhältnisse, das uns noch ganz unbekannt ist. So kann z. B. schon die pro Zeiteinheit zugeführte Lichtmenge, d. h. die Lichtintensität, dieses Verhältnis verändern. Pringsheim fand ja, wie wir schon sahen, daß nicht alle Lichtintensitäten die Eigenschaft hatten, nach kurzer Einwirkung eine erste Indifferenz zu veranlassen: in Entfernungen, die 200 cm von seiner Auer- oder Nernstlampe überschritten, blieb sie aus.

Kurze Belichtung und Dauerbelichtung werden sonach recht verschiedene Wirkungen haben können. Jedenfalls werden die Verhältnisse bei Dauerbelichtung besonders kompliziert und schwierig zu deuten sein.

Die mitgeteilten Tatsachen klären aber die Beobachtungen auf, die z. T. schon Oltmanns und danach Pringsheim bei solcher Dauerbelichtung bezüglich der Reaktionszeiten gemacht haben. Bei Dauerbelichtung etiolierter und am Lichte gezogener Keimlinge krümmten sich die Dunkelpflanzen bei geringer Lichtintensität schneller als die Lichtkeimlinge, in der Nähe der Lampe dagegen die Lichtkeimlinge schneller als die Dunkelkeimlinge. Unerwartet ist dagegen Pringsheims Ergebnis, daß die Lichtpflanzen bei einseitiger Belichtung die absolut kleinsten phototropischen Reaktionszeiten aufweisen.

Was nun das Wesen der Abstumpfungsvorgänge betrifft, so sind Pringsheim und Blaauw der Meinung, daß die Abstumpfung ganz mit den Adaptationserscheinungen des menschlichen Auges identisch ist.

2b) Elektrotropismus. Da wir das Licht als sehr verbreiteten Richtungsreiz kennen gelernt haben, entsteht die Frage, ob die verwandten Aetherwellen größerer Wellenlänge nicht auch richtend wirken können. Für die (Hertzschen) elektrischen Wellen wurde dies von Hegler behauptet. Die Angabe bedarf der Bestätigung und eventuell weiterer Untersuchung.

2c) Thermotropismus. Besser begründet sind die Angaben verschiedener Autoren, daß auch die dunklen Wärmestrahlen tropistische Krümmungen auslösen können. Freilich scheint ein solcher Thermotropismus zur Orientierung im Raume nur wenig ausgebildet und kaum verwendet zu werden.

Wortmann will an dem Keimstengel von Lepidium sativum negativen, bei den von Zea Mays positiven, bei den Sporangienträgern von Phycomyces nitens wiederum negativen Thermotropismus beobachtet haben. Steyer dagegen fand bei einer genauen Nachuntersuchung Phycomyces indifferent, die beiden Keimlinge positiv thermotropisch bei hohen Temperaturen, negativ bei niederen Temperaturen. Auch diese Erscheinungen bedürfen noch genauerer Untersuchungen. Positiven Thermotropismus beobachtete Voechting auch an den Blütenstielen von Anemone stellata.

Neben diesem Thermotropismus durch strahlende Wärme gibt es auch einen solchen durch geleitete Wärme (auch Caloritropismus genannt). Als Wortmann Keimwurzeln in einem mit Sägespänen gefüllten Zinkkasten kultivierte, dessen eine Längswand er auf 40° C, dessen andere er auf 9° C erwärmte, so krümmten sich z. B. bei Ervum lens und Pisum sativum die Wurzelspitzen in der „wärmeren Hälfte" negativ, in der „kühleren" positiv.

2d) Geotropismus. Ebenso verbreitet und wichtig wie der Phototropismus sind Reizbewegungen, die durch die Schwerkraft ausgelöst werden und die man Geotropismus nennt. Wenn alle Bäume eines Waldes oder alle Halme eines Feldes parallel zueinander in Richtung des Lotes nach oben,

ihre Wurzeln umgekehrt in Richtung des Lotes nach unten wachsen, wenn auch an steilen Berghängen die Baumstämme, die Stengel der Kräuter usw. nicht senkrecht zur Bodenoberfläche, sondern senkrecht zur Horizontalen orientiert sind, eine Eigentümlichkeit der Pflanzen, die einem so selbstverständlich erscheint, daß man erst vor etwa 200 Jahren begann, sich darüber zu wundern (Dodart), so ist daran nur eine sehr eigentümliche Empfindlichkeit dieser Gewächse gegen die Schwerkraftrichtung, nicht aber etwa der Phototropismus schuld. Worum es sich da handelt, das sieht man am besten, wenn durch Schneedruck, schweren Regen oder durch die Tritte von Weidevieh oder Menschen usw. die Halme oder Stengel umgelegt, also aus ihrer normalen Stellung abgelenkt sind: meist nach verhältnismäßig kurzer Zeit richten sich alsdann durch Krümmungsbewegungen die Stengelspitzen langsam wieder auf, bis sie in ihre alte Lage zurückgekehrt sind, bis sie also wieder senkrecht vom Erdzentrum wegwachsen.

Seitenzweige und Blätter kehren ebenfalls in ihre normale Lage, d. h. in die Horizontale oder in die ihnen eigentümliche schräge Stellung zum Lote zurück. Eingehende Laboratoriumsversuche zeigten weiter, daß Keimwurzeln, die man aus der Lotlinie ablenkt, ebenfalls durch Krümmungen in die Senkrechte zurückstreben, bis sie wieder nach dem Erdzentrum hin wachsen. Ja, auch dann kehren Keimwurzeln oder Stengel durch solche Krümmungen in ihre Normalstellung zurück, wenn man sie „auf den Kopf", wie man sagt, invers stellt. Das abgeschnittene und an der Spitze fixierte Organe sich ebenfalls geotropisch krümmen, darauf braucht wohl kaum hingewiesen zu werden.

Der Beweis dafür, daß es sich bei diesen interessanten Bewegungserscheinungen um eine Wirkung der Schwerkraft handelt, wurde durch Versuche an Zentrifugalapparaten erbracht. Als Knight keimende Samen an einem schnell rotierenden Wasserrade befestigte, beobachtete er, daß die Stengel sich solange krümmten, bis ihre Spitzen parallel zum Radius, d. h. zur Fliehkraftrichtung, nach dem Radzentrum hin orientiert waren, die Wurzeln solange, bis ihre Spitzen entgegengesetzte Richtung eingenommen hatten. An jeder Zentrifuge läßt sich im Laboratorium dieser Versuch wiederholen. Dabei stellt man die Rotationsebene am besten senkrecht. Man kann also die gleichen Krümmungen wie durch die Schwerkraft durch die Zentrifugalkraft hervorrufen. Mit Recht zog Knight daraus den Schluß, daß in beiden Fällen offenbar eine Massenwirkung das veranlassende Moment ist.

Nicht aber um eine direkte Massenwirkung wie bei dem Fallen eines Gewichtes kann es sich bei den durch die Schwerkraft veranlaßten Bewegungen handeln; z. B. werden die Wurzeln nicht einfach durch die Schwere ihrer Spitzen passiv nach unten gezogen und dadurch in ihrer senkrechten Stellung festgehalten. Es läßt sich nämlich leicht zeigen, daß die aus der Lotrechten abgelenkten Wurzeln sich durch aktive Kraft, die Hindernisse zu überwinden vermag, geradezu in die Erde einbohren, um ihre normale Lage wieder zu erreichen: eine solche Wurzel vermag ein Gewicht vor sich her zu schieben, in Quecksilber, auf das man sie legt, einzudringen, in Lehm sich hineinzuzwängen. Zudem kann ja beim Stengel von Abwärtssinken gar keine Rede sein: im Gegenteil, er richtet sich ja der Schwerkraft entgegen auf; dies ist nur unter aktiver Arbeitsleistung möglich.

Eine richtige Auffassung aller dieser Bewegungen gewann man erst, als man lernte, sie wie die phototropischen Krümmungen als Reizvorgänge aufzufassen, die nur ganz indirekt mit einer durch die Schwerkraft gegebenen Massenwirkung verknüpft sind. Die Schwerkraft oder die ihr entsprechende Massenwirkung ist eben bloß der auslösende Faktor und deshalb spricht man von geotropischen Bewegungen und von Schwerkraftsreizen. Daß durch die Zentrifugalkraft an der Zentrifuge ganz die gleichen Reizbewegungen ausgelöst werden, ist vor kurzem noch besonders dadurch bewiesen worden, daß eine Zentrifugalkraft von der Größe der Massenbeschleunigung g, wie sie der Schwerkraft entspricht, ganz ebenso starke Krümmungen auslöst wie die Schwerkraft, und daß kurze Einwirkungen der Schwerkraft und einer Zentrifugalkraft sich in ihrem krümmungsauslösenden Effekte summieren, nicht aber entsprechende Licht- und Schwerkraftwirkungen.

α) Arten der Geotropismen. Genau wie beim Phototropismus lassen sich auch vier geotropische Reaktionsarten unterscheiden: positiver, negativer Geotropismus, Transversal- oder Diageotropismus und Geotorsion. Alle vier sind im Pflanzenreiche sehr weit verbreitet. Negativ geotropisch sind fast alle orthotropen Stengel und Blätter (z. B. der Schwertlilie, der Binsen u. a.), ferner viele orthotrope Hutstiele und Sporangienträger von Pilzen: sie krümmen sich vom Ausgangspunkte des veranlassenden Außenfaktors weg (auf der Zentrifuge also nach der Rotationsachse hin). Positiv geotropisch und zwar sehr ausgesprochen sind die meisten Hauptwurzeln (sie krümmen sich auf der Zentrifuge also radial nach außen) und die Rhizoiden vieler niederer Pflanzen. Transversal geotropisch sind viele Seitenzweige, die Stiele mancher Blüten (Narcissus, Amaryllis), die Seitenwurzeln erster Ord-

nung und sehr viele dorsiventrale Organe, wie dorsiventrale Luftsprosse, Rhizome, Blätter und viele Thallome. Geotorsionen kommen ebenfalls an vielen dorsiventralen Gebilden, wie namentlich Seitenzweigen, Blättern und Blüten (Orchideen, Cytisus Laburnum u. a.) vor.

Alle geotropischen Bewegungen hören erst dann auf, wenn das betreffende Organ seine ganz bestimmte Richtung zur Schwerkraftrichtung angenommen hat. Die Ruhelage, der sogenannte „Grenzwinkel", kann jeden Winkel mit der Senkrechten einschließen. Viele Rhizome sind horizontal, die Seitenwurzeln erster Ordnung schräg nach abwärts gerichtet, und zwar in verschiedenem Maße schräg, je nach der Entfernung von der Spitze der Hauptwurzel. Wie beim Phototropismus gibt es offenbar alle Uebergänge zwischen negativem, transversalem und positivem Geotropismus. Besonders interessant sind in dieser Hinsicht die plagiotropen Organe und unter ihnen wieder die dorsiventralen. Auch jedes plagiotrope Organ, wie z. B. eine Seitenwurzel erster Ordnung, ein verdunkeltes Rhizom von Heleocharis, Adoxa, Paris, mag es nun aus seiner Ruhelage nach oben oder nach unten abgelenkt sein, strebt durch eine geotropische Krümmung auf kürzestem Wege in seinen Grenzwinkel zurück (Fig. 2). Dabei ist es bei diesen und

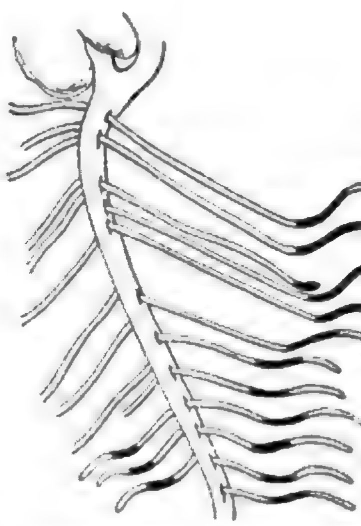


Fig. 2. Vicia Faba. Hauptwurzel mit Seitenwurzeln in Erde hinter Glas gewachsen; zunächst in normaler, dann in umgekehrter, zuletzt wieder in normaler Stellung. Der Zuwachs in der verkehrten Lage ist schwarz gehalten. Nach Sachs.

anderen radiär gebauten, plagiotropen Organen völlig gleichgültig, ob die alte Oberseite oder irgendeine andere Seite zur neuen Oberseite wird. Ein dorsiventrales plagiotropes Organ, wie z. B. viele Blätter, Seitenzweige, Thallome, Blütenstiele, findet dagegen seine Ruhelage stets erst dann wieder, wenn es durch entsprechende Bewegungen erstens seinen normalen Grenzwinkel, zweitens aber auch in diesem seine normale Lage, mit der normalen Oberseite nach oben, wieder angenommen hat. Die Rückkehr in die normale Lage wird meist durch Geotorsionen erleichtert. In gleicher Weise verhalten sich übrigens dorsiventrale plagiotrope Organe gegenüber einseitiger Beleuchtung, falls sie phototropisch sind. Negativ geotropische Organe pflegen positiv phototropisch zu sein und umgekehrt; plagiotrope Organe dagegen sind oft in gleichem Sinne transversal geo- und phototropisch. Phototropische Reaktionsbefähigung und Reaktionsweise ist indes von der geotropischen völlig unabhängig; z. B. sind viele Wurzeln nicht phototropisch, aber ausgesprochen geotropisch; andere wieder, wie die Haftwurzeln von Orchideen, Aroideen, nicht oder nur schwach geotropisch, dagegen vielfach phototropisch.

Wie beim Phototropismus, so läßt sich auch beim Geotropismus in der Regel leicht zeigen, daß die entsprechenden Krümmungsbewegungen sehr zweckmäßige Anpassungen sind.

β) Besonderheiten im Geotropismus. Wie beim Phototropismus, so kommen auch im geotropischen Verhalten Besonderheiten vor, die sich manchmal durch eigentümliche biologische Bedürfnisse erklären lassen: Atemwurzeln von Sumpfpflanzen (wie z. B. den Mangrovepflanzen Sonneratia, Avicennia), die sich aus dem Wasser in die Luft erheben sollen, sind nicht positiv, sondern negativ geotropisch. Gleiches gilt von den Wurzeln mancher Epiphyten, die in ihrem Wurzelgeflechte Humus sammeln. Umgekehrt scheinen positiv geotropisch die abwärts wachsenden Rhizome von Yucca, Cordyline u. a. zu sein; positiv geotropisch sind vorübergehend auch die hypokotylen Stengelglieder mancher Keimpflanzen (z. B. Lupinus, Helianthus, Cucurbita), desgleichen die Keimblätter mancher Monokotylen (Phönix, Allium). An plagiotropen, transversal geotropischen Seitenzweigen entstehen oft orthotrope, negativ geotropische Infloreszenzen; ebenso an kriechenden Zweigen senkrecht aufrechte Aeste. Durch entsprechende geotropische Bewegungen, bald positive, bald negative, bald transversale, bald Geotorsionen, werden oftmals ferner die verschiedenen Teile der Blüten in ihre „richtige" Lage gebracht; so können sogar unter dem Einflusse der Schwerkraft und zwar durch geotropische Reaktionen aus radiären Blütenanlagen ausgesprochen dorsiventrale (zygomorphe) Blüten bei manchen Arten sich entwickeln. Auch Umwandlungen im tropistischen Verhalten ähnlicher Art, wie wir sie bei Linaria Cymbalaria für den Phototropismus kennen gelernt haben, soge-

nannte Umstimmungen, sind in großer Zahl bekannt geworden. Z. B. ist beim Mohn (Papaver), ferner bei Tussilago, Cyclamen u. a. die Blütenknospe zunächst infolge des positiven Geotropismus des Blütenstieles nickend; später richtet sie sich auf, indem der Stiel negativ geotropisch wird. Manche Rhizome sind zuerst transversal geotropisch, später negativ geotropisch (z. B. Adoxa). Was hier irgendwie eine unbekannte autonome Entwickelungsänderung ist, kann manchmal durch äußere Eingriffe bewirkt werden: Schneidet man den Gipfeltrieb einer Tanne oder die Hauptwurzelspitze (dies bei vielen Pflanzen) ab, so wird eines der nächstbenachbarten transversal geotropischen Seitenorgane (geotropisch) orthotrop.

Geotropismus bei Windepflanzen. In eigenartiger, übrigens noch keineswegs befriedigend bekannter Weise scheint der Geotropismus auch beim Winden der Schling- oder Windepflanzen beteiligt zu sein.

Bekanntlich erheben sich diese Pflanzen mit ihren dünnen, schwanken Trieben dadurch vom Boden in die Luft und (im Walde) ans Licht, daß sie mit ihren Stengeln oder Blättern (Lygodium scandens) irgendwelche Stützen in Schraubenwindungen umschlingen. Diese Windungen umlaufen, von oben gesehen, entweder im Sinne des Uhrzeigers die Stütze: „Rechtswinder" (Hopfen, Lonicera) oder meist in entgegengesetztem Sinne: „Linkswinder" (Fig. 3); manchmal wechselt auch die Richtung (z. B. Polygonum Convolvulus). Erst wenn die zunächst steif aufrechten, orthotropen Keimpflanzen erstarkt sind, beginnen sie zu winden, indem die Sproßspitze transversal geotropisch (?) wird, sich horizontal richtet und gleichzeitig anfängt, mit „kreisender" Windebewegung im Raume herumzuschwingen. Während die dauernd horizontale Spitze sich im Kreise um die Stütze herumbewegt, kehrt sie ihr nicht fortgesetzt eine und dieselbe Seitenkante zu. Vielmehr wird von Moment zu Moment der kreisenden Bewegung eine andere Längszone des Stengels der Stütze zugekehrt und damit konkav. Das gleiche kann man bei einem Kautschukschlauche beobachten, dessen unteres Ende man in Schraubenwindungen um einen senkrechten Holzstab herumgewickelt, dessen oberes Ende man durch ein hineingestecktes Stück Bleirohr in horizontale Lage gebracht hat, wenn man nämlich dieses obere Ende durch seitlichen Druck weiter um die Stütze in kreisender Bewegung herumführt: Während der Bewegung wechselt fortgesetzt die der Stütze zugekehrte, vorangehende seitliche Kante so, daß ein Punkt, den man auf dem Schlauchende markiert hat, die Peripherie eines senkrecht gerichteten Kreises beschreibt, während die Schlauchspitze einmal horizontal im Kreise um die Stütze herumbewegt wird. Dabei ist die Bewegung von außen gesehen der kreisenden gegenläufig: erfolgt die letztere im Sinne des Uhrzeigers, so bewegt sich der Punkt im entgegengesetzten Sinne. Da die

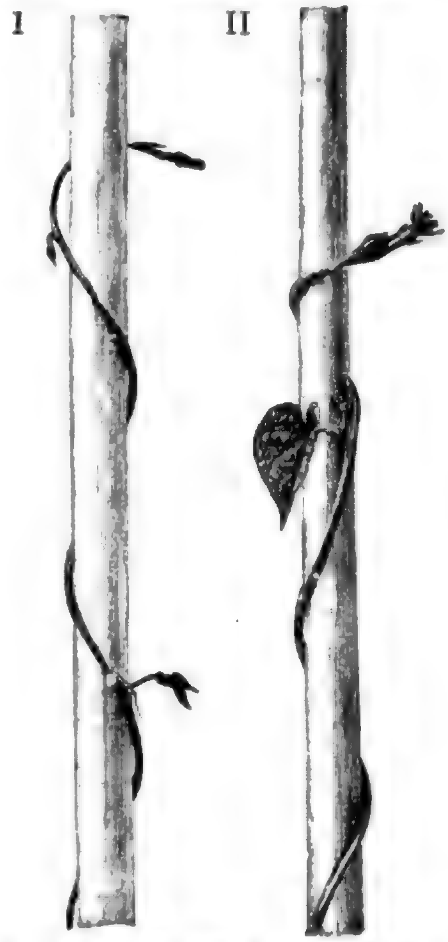


Fig. 3. I Linkswindender Sproß von Pharbitis. II Rechtswindender Sproß von Myrsiphyllum asparagoides. Aus dem „Bonner Lehrbuch".

der Stütze zugekehrte Kante immer die konkave ist, wie ebenfalls das Modell lehrt, so kommt also die Windebewegung durch eine horizontale Krümmungsbewegung der entgegengesetzten, von der Stütze abgewendeten Seitenkante der Stengelspitze zustande, und da während der Windebewegung fortgesetzt andere Längszonen konkav werden, so muß auch fortgesetzt eine andere Zone konvex werden. Immer ist es die jeweilig der Stütze abgewendete Längszone (bei den Linkswindern von oben gesehen die rechte Seitenkante, bei den Rechtswindern die linke), die durch Konvexwerden die Windebewegung des Sprosses fortsetzt. Die Krümmungsbewegung, die das Winden zur Folge hat, findet sonach in einer Ebene statt, die parallel zur Horizontalebene ist.

Die hinter der Sproßspitze gelegenen, nicht mehr kreisenden Sproßteile werden nun negativ geotropisch: sie richten sich

nach Möglichkeit auf. Dadurch werden die zunächst ganz lockeren Windungen steiler und enger; zugleich werden sie der Stütze fest angepreßt. Noll hat die Ansicht zu begründen gesucht, daß die horizontale Krümmungsbewegung eine eigenartige geotropische Bewegung ist, die sich nicht durch Konvexwerden der von der Erde abgewendeten Oberseite (wie beim positiven Geotropismus) oder der der Erde zugekehrten Unterseite (wie beim negativen Geotropismus), sondern durch Konvexwerden einer Flanke äußert. Noll spricht deshalb von Lateralgeotropismus. Wenn die Möglichkeit eines solchen Geotropismus auch nicht geleugnet werden kann, so scheinen doch zwingende Beweise noch dafür zu fehlen, daß die Bewegung tatsächlich geotropischer Natur ist.

γ) Art der Schwereperzeption. Schon die Abhängigkeit der geotropischen Bewegung von der Schwerkraftrichtung läßt vermuten, daß Geotropismus ebenso wie Phototropismus nur dann ausgelöst werden kann, wenn eine einseitig wirkende, also richtende Reizursache vorhanden ist. Tatsächlich ist dies so. Verhindert man es, daß die Schwerkraft dauernd in einer bestimmten, von der normalen abweichenden Richtung wirkt, so treten keine geotropischen Krümmungen ein. Sehr leicht und einfach läßt sich dies wie beim Phototropismus an orthotropen Organen dadurch erreichen, daß man die Versuchspflanzen dauernd auf einem Drehwerke so dreht, daß die Schwerkraft auf allen Seiten gleich wirkt: um eine horizontale Achse in vertikaler Ebene oder parallel oder schräg zu der horizontalen Drehachse. Solche Apparate, die im Laboratorium bei allen möglichen Versuchen Verwendung finden, eben um tropistische Krümmungen auszuschließen, nennt man Klinostaten (Fig. 4). Sie sind in der verschiedensten Weise konstruiert worden, mit Antrieb durch fallende Gewichte, durch Uhrfedern, durch Elektromotoren, für kleine und für große Lasten. Mit Hilfe eines solchen Uhrwerkes kann man also, an orthotropen Organen wenigstens, die geotropischen Krümmungen völlig ausschließen und z. B. phototropische Krümmungen ohne die störenden geotropischen Gegenwirkungen beobachten. Die Umdrehungsgeschwindigkeit wählt man dabei vorteilhaft zwischen 3 und 30 Minuten. Störende Zentrifugalkraftwirkungen treten bei solchen Geschwindigkeiten noch nicht auf. Daß man außer den geotropischen auch phototropische Wirkungen durch geeignete Drehung ausschließen kann, braucht wohl kaum gesagt zu werden. Dorsiventrale Organe führen am Klinostaten meist Krümmungen aus, die sich nicht ohne weiteres ihrem Wesen nach verstehen lassen (siehe weiter unten).

Ganz besonders dringlich erscheint die Frage, wodurch die „Schwerkraft" perzipiert wird. Entscheidend für dieses Problem ist der Knightsche Versuch, durch den gezeigt wurde, daß die Schwerkraft sich durch die Zentrifugalkraft ersetzen läßt. Freilich bedurfte es noch des besonderen Nachweises, daß in beiden Fällen die Perzeption die gleiche ist. Ihn hat Pekelharing geführt, indem sie zeigte, daß durch Zusammenwirken unterschwelliger Schwerkraft- und Zentrifugalkräfte eine Reaktion erzielbar ist. Offenbar ist entscheidend für die Perzeption eine Massenwirkung durch Druck. Weiter wissen wir zunächst nichts! Alles spricht aber dafür, daß die Massenwirkung in einer Einzelzelle schon zur Perzeption genügt; denn auch einzellige Organe reagieren geotropisch. Fraglich ist es indeß, ob das Plasma nur für den Druck von verhältnismäßig groben Massen, wie z. B. Stärkekörnchen, größeren Kriställchen, die nachweislich oft dem Zuge der Schwere (oder der Zentrifugalkraft) folgend nach abwärts sinken und sich einseitig ansammeln, empfindlich ist oder ob es nicht schon durch den Druck seiner Teile aufeinander, des Zellkerns, der Mikrosomen und anderer spezifisch nicht oder nur wenig

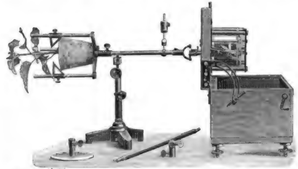


Fig. 4. Klinostat nach Pfeffer. Ausgeführt von Mechaniker Albrecht in Tübingen.

schwererer oder auch leichterer Körperchen oder gar durch den einseitigen, von der Schwerkraftrichtung abhängigen Druck des Zellsaftes gereizt wird, eine Annahme, die indes wegen des hohen in den Zellen bereits herrschenden Turgordruckes recht unwahrscheinlich ist. Von großer Wichtigkeit zur Entscheidung dieser Frage sind alle die Fälle, wo ein Geotropismus in Zellen oder Geweben ausgelöst wird, in denen grobe Massen fehlen. Dies ist z. B. nach Bischoff der Fall bei den Lebermoosrhizoiden, bei den nach Knoll ganz besonders geotropisch empfindlichen Hutstielen von Coprinus stiriacus. In anderen Fällen wieder kommen Stärkekörnchen vor, die, obwohl sie spezifisch schwerer sein dürften, doch nicht dem Zuge der Schwere folgen können, z. B. bei Caulerpa (Haberlandt). Diese Objekte zeigen doch eben, daß eine erfolgreiche Geoperzeption auch ohne die einseitige Druckwirkung größerer Mengen sich zusammenlagernder grober Körner, ja ganz ohne solche grobe Körner möglich ist. Sollte gleichwohl hier die Geoperzeption auf einer minimalen einseitigen Druckwirkung (etwa der Plasmateile aufeinander oder des Zellsaftes auf das Plasma) beruhen, was wahrscheinlich, aber keineswegs bewiesen ist, und allgemein auch bei stärke- oder kristallhaltigen Pflanzen in dieser Weise möglich sein, so wäre es natürlich nicht ausgeschlossen, daß solche grobe, leicht oder nicht bewegliche Körper die Geoperzeption wesentlich zu verstärken imstande sind.

δ) Zeitlicher Verlauf. Auch die geotropischen Krümmungen beginnen erst mehrere bis viele Minuten nach dem Reizungsbeginne und dauern manchmal Stunden lang. Wie beim Phototropismus wäre schnelles Reaktionsvermögen geradezu schädlich. Wie oft kommt es vor, daß Stengel oder Blätter durch Wind aus ihrer Ruhelage abgelenkt werden! Würde da jede Ablenkung schnell mit einer Reizkrümmung beantwortet werden, so würden die betreffenden Organe sich fast dauernd hin und her krümmen müssen. Besonders lange Zeit brauchen die Reizkrümmungen der Grasknoten und der verdickten Baumstämme. Verhältnismäßig schnell dagegen ist der Reizvorgang oft beendet bei Keimlingsstengeln und bei Wurzeln. Ob dafür auch ökologische Gesichtspunkte sich gewinnen lassen, ist wohl fraglich.

ε) Abhängigkeit der Krümmungsintensität vom Neigungswinkel. Was die Abhängigkeit der geotropischen Reizkrümmungen von der Angriffsrichtung des Reizes betrifft, so ist für geotropische Organe exakt gezeigt worden, daß von allen Ablenkungswinkeln aus der Ruhelage die Horizontale die stärkste Wirkung hat. Zwei Methoden boten sich für diesen Nachweis. Zunächst die kontinuierliche Drehung der Organe an der schräg gestellten Klinostatenachse, an der die Organe selbst schräg befestigt waren: Ausnahmslos trat eine Krümmung im Sinne derjenigen Lage ein, die am wenigsten von der Horizontalen abwich. Dann die Methode der intermittierenden Reizung abwechselnd gleichlang auf Gegenseiten in zwei verschiedenen Ablenkungswinkeln am intermittierenden Klinostaten, die gleiche Ergebnisse lieferte. Hiermit war eine frühere, auf unzureichender Methodik beruhende Angabe Czapeks widerlegt, wonach die „Optimale" nicht durch die Horizontale gekennzeichnet sei.

Man kann auch das Verhältnis bestimmen, in dem die geotropischen Reizungen in verschiedenen Ablenkungswinkeln aus der Ruhelage zueinander stehen: Tritt bei solchen eben erwähnten intermittierenden und einander genau entgegengerichteten Reizungen eine geotropische Krümmung ein, so kann sie bei gleicher Zeitdauer der entgegengerichteten Reizungen nur durch eine verschiedene Größe der Ablenkungswinkel oder bei gleichen Ablenkungswinkeln nur durch die verschiedene Zeitdauer der Reizungen bedingt sein. Tritt dagegen eine geotropische Krümmung nicht ein, so müssen bei gleicher Zeitdauer der Reizungen die Ablenkungswinkel gleich, bei ungleicher Reizdauer aber ungleich sein; und zwar werden die Winkel um so größer sein müssen, je kleiner die Zeitdauern der zugehörigen Reizungen bemessen werden und umgekehrt. Die Reaktion wird natürlich nur dann völlig unterbleiben, wenn die Größen der Ablenkungswinkel und die Expositionszeiten umgekehrt proportional sind. Mit dieser Kompensationsmethode, die für das Studium der Reizvorgänge schon viel geleistet hat und noch mehr zu leisten verspricht, konnte festgestellt werden, daß z. B. bei Vicia Faba-Keimsprossen mit überraschender Genauigkeit die empirisch ermittelten Expositionszeiten umgekehrt, die geotropischen Wirkungen aber direkt dem Sinusverhältnisse der Ablenkungswinkel proportional sind.

Da die geotropischen Wirkungen der Wirksamkeit des auslösenden Anlasses proportional sind, so kann man dieses Ergebnis auch so formulieren, daß man sagt: der Anlaß beim Geotropismus wirkt so, als ob er proportional dem Sinus der Ablenkungswinkel wäre, als ob z. B. in 45° Ablenkung nicht die Massenbeschleunigung g, sondern nur die Beschleunigung $g . \sin 45^0$ angriffe. Dabei besteht für gleiche geotropische Wirkungen in verschiedenen Ablenkungswinkeln zwischen der wirksamen Massenbeschleu-

nigung und den Expositionszeiten die gesetzmäßige Beziehung, daß die Wirkungen gleich werden, wenn die in den Ablenkungswinkeln als wirksam gedachten Massenbeschleunigungen (die den Sinus der Ablenkungswinkel entsprechen) den Expositionszeiten umgekehrt proportional sind. Könnte man ohne weiteres annehmen, daß tatsächlich in den verschiedenen Neigungswinkeln nicht g, sondern nur ein entsprechender Bruchteil davon angreift, so könnte man diesen Satz ohne weiteres in die Formel kleiden:

$$g.\sin\alpha : g.\sin\beta = t_\beta : t_\alpha,$$

wobei α und β zwei Neigungswinkel, t_α und t_β die zugehörigen Expositionszeiten sind. Aus dieser Formel würde aber folgen:

$$g.\sin\alpha \times t_\alpha = g.\sin\beta \times t_\beta,$$

d. h. gleiche Wirkungen würden dann resultieren, wenn die Produkte aus der im Winkel wirksamen Massenbeschleunigung und den Expositionszeiten gleich sind. Hiermit wäre die gesetzliche Beziehung zwischen Reizanlaß und Reizdauer formuliert, wodurch die Intensität der Wirkung bestimmt wird.

Außer durch die Kompensationsmethode wurde dann von Bach und später noch genauer von Pekelharing durch Bestimmung der Präsentationszeiten bei einigen Pflanzen gezeigt, daß auch dafür in den verschiedenen Ablenkungswinkeln nicht die Massenbeschleunigung g, sondern nur ihr „Sinuswert" in Betracht kommt: die Präsentationszeiten sind nämlich umgekehrt proportional den Sinus der Ablenkungswinkel aus der Ruhelage. Dies gilt wenigstens für die Ablenkungswinkel 90° bis 30° nach Bach; nach Pekelharing auch noch für viel kleinere Ablenkungswinkel; freilich sind die Zahlen letzterer Forscherin in dieser Hinsicht noch nicht überzeugend.

Während also die Präsentationszeiten ausgesprochen von der Größe der Ablenkungswinkel beeinflußt werden, ist das nach Czapek und Bach[1]) für die Reaktionszeiten ganz anders. Sie sind innerhalb der Ablenkungswinkel 15° bis 165° annähernd gleich: ein Beweis dafür, daß die Reaktionszeiten von den Intensitäten der Gesamterregung in hohem Maße unabhängig sind. Unterhalb 15° und oberhalb 165° müssen sie dann freilich wohl schnell bedeutend wachsen; denn in der Ruhelage erreichen sie den Wert ∞.

Wie soll man es nun verstehen, daß für die geotropische Wirkung in verschiedenen Ablenkungswinkeln nicht die Massenbeschleunigung g, sondern nur ihr „Sinuswert" in Betracht kommt? Am nächsten liegt die alte, schon von Sachs gemachte Annahme, daß in jedem Neigungswinkel bloß die auf der Längsachse des orthotropen Organes rechtwinkelige Komponente der Schwere wirksam ist. Beruht die geotropische Wirkung auf einem Drucke, so wird seine Komponente, die auf den in der Ruhelage am wenigsten, d. h. gar nicht gedrückten Teilen, senkrecht steht, um so größer werden, je mehr der Neigungswinkel aus der Ruhelage sich 90° nähert, und zwar entsprechend den Sinuswerten der Neigungswinkel. Ja, gerade in dem Sinusgesetz dürfte man einen weiteren wichtigen Indizienbeweis dafür erblicken können, daß die geotropische Reizung tatsächlich durch eine Druckwirkung zustande kommt. Dann sollte man aber exakter sagen, der Reizanlaß ist gegeben durch die Druckwirkung D_g, die der Massenbeschleunigung g entspricht; denn der Druck D, nicht die Massenbeschleunigung ändert sich mit dem Neigungswinkel. Ist also der Neigungswinkel α, die Massenbeschleunigung g, so ist der Reizanlaß $D_g \sin\alpha$; ist die Massenbeschleunigung M, so ist der Anlaß $D_M \sin\alpha$.

Durch Einführung solcher Symbole aber wird erst der Sinn der oben mitgeteilten Formeln klar verständlich, die die Beziehungen zwischen Reizanlaß und Expositionszeiten für verschiedene Ablenkungswinkel angaben:

$$D_g \sin\alpha : D_g \sin\beta = t_\beta : t_\alpha$$

$$\text{und } D_g \sin\alpha \times t_\alpha = D_g \sin\beta \times t_\beta.$$

Sie erhalten noch allgemeinere Fassung, wenn man für g das Symbol M = Massenbeschleunigung einsetzt.

Die gegebene Deutung, und sonach auch diese Formeln, würde in gleicher Weise für orthotrope und für plagiotrope Organe befriedigen, soweit unsere Kenntnisse reichen.

Für andere Tropismen ist die Bedeutung der Ablenkungswinkel aus der Ruhelage für die Intensität der Reizwirkung noch nicht ermittelt worden. Möglicherweise, ja wahrscheinlich liegen hier die Verhältnisse ganz anders.

Schon die Untersuchungen, die eben mitgeteilt wurden, sprechen dafür, daß die Wirkung der Neigungswinkel nichts anderes ist als ein Spezialfall der Wirkung verschiedener Intensitäten des geotropischen Reizanlasses. Tatsächlich ist das jetzt kaum eine Frage mehr.

ζ) Abhängigkeit der Reaktion von der Reizintensität und der Reizungsdauer. Auch bei allen Untersuchungen, bei denen man die Intensitäten der Reizanlässe und die Reizdauern verändert, zeigt es sich, daß man es bei den Erfolgen zu tun hat mit einer Wirkung der Anlässe in der

[1]) Aehnlich auch Pekelharing.

Zeit: Die Reizung wird geradezu dadurch bedingt, daß eine Intensität des Anlasses eine gewisse Zeitlang einwirkt. Das ging schon besonders deutlich aus Versuchen mit kontinuierlicher und intermittierender geotropischer Reizung hervor, die zeigten, daß es auch für die geotropische Wirkung bei beiden Arten von Reizungen im wesentlichen nur auf die Summe der Zeit ankommt, während deren die Versuchspflanzen aus der normalen Ruhelage abgelenkt sind, vorausgesetzt, daß bei intermittierender Reizung die Ruhepausen zwischen den Einzelreizen nicht allzu lange, z. B. etwa so lange wie die Einzelreizungen währen.

Unsere Einsicht wurde noch weiter vertieft, als man näher den Einfluß der Reizintensitäten auf die Präsentations- und auf die Reaktionszeiten untersuchte. Das geschah zunächst von Bach für den Geotropismus.

Geotropische Präsentationszeiten bestimmt man wieder am besten makroskopisch, indem man die gereizten Organe am Klinostaten rotieren läßt, und zwar wiederum als Mittelwert aus sehr zahlreichen Einzelbeobachtungen. Die bisherigen Bestimmungen zeigen, daß die Präsentationszeiten bei allen sonstigen individuellen und Speciesverschiedenheiten stets viel kürzer als die Reaktionszeiten sind. Bach ermittelte in Zimmertemperatur z. B. folgende Werte:

Präsentationszeit	Reaktionszeit
Blütensprosse von Capsella	
unterhalb 2 Minuten	ca. 40 Minuten
Keimsprosse von Vicia Faba	
5 Minuten	ca. 85 Minuten

Längere Präsentationszeiten erzielte man z. B. für die Hypokotyle von Lupinus albus (20 bis 25 Minuten), für die Koleoptilen von Setaria alopecuroides (ca. 12 Minuten) und die von Panicum sanguinale (ca. 10 Minuten) und bei Keimsprossen von Sinapis (20 bis 25 Minuten).

Das Verhältnis der Präsentationszeit zur Reaktionszeit beträgt nach Bach bei den Keimsprossen von Vicia Faba in 20° 1:13. Vergleichende Untersuchungen über das Verhältnis der Präsentationszeiten für verschiedene Reizanlässe an einem Organe fehlen.

Die Präsentationszeit erwies sich, was man vorher nicht ahnen konnte, in engster Abhängigkeit von der Massenbeschleunigung, als die Versuchspflanzen zentrifugiert wurden: Sie wurde um so kleiner, je mehr die Zentrifugalkraft wuchs. Bei 22 bis 32 g betrug sie nur $^1/_4$ Minute, bei 0,13 bis 0,15 g dagegen 50 Minuten. Graphisch ausgedrückt gaben die Zahlen eine ausgesprochene Hyperbelkurve. Auch auf die Reaktionszeit hat die Variation der Massenbeschleunigung einen Einfluß: Bei den Keimsprossen von Vicia Faba ist zwar schon bei Reizung mit 1 g das Minimum der Reaktionszeit erreicht. Verminderung der Massenbeschleunigung zieht aber schließlich eine Verlängerung der Reaktionszeit nach sich, und zwar ergeben diese Zeiten für die verschiedenen Massenbeschleunigungen eine Kurve, die ebenfalls einer Hyperbel sehr ähnlich sieht.

Was die Intensitätsschwelle betrifft, so gibt Czapek an, geotropische Reaktionen bei manchen Keimlingen noch beobachtet zu haben, als die verwendete Zentrifugalkraft 0,001 g betrug. Jost erzielte bei Linsenwurzeln und Panicumkoleoptilen mit Schleuderkräften von 0,02—0,05 g noch „die schönsten Krümmungen", obwohl diese Zentrifugalkräfte nicht ausreichten, eine einseitige Ansammlung der Stärke in den Zellen zu veranlassen.

Bei Zufuhr also einer bestimmten Reizmenge, unabhängig von der Intensität des Anlasses und der Dauer der Exposition, wird die Schwelle für die Krümmung, d. h. die Präsentationszeit, erreicht. Beispiel:

Präsentationszeiten von Avenakoleoptilen für verschiedene Zentrifugalkräfte nach Pekelharing:

Präsentationszeit in Sekunden	Kraft in Dynen	Zeit × Kraft
3900	0,08	312
2230	0,14	312
415	0,76	315
310	1,04	322
135	2,304	311
18	17,28	311
5	58,43	292

Daß sich diesem Gesetze auch die Ergebnisse mit geotropischer Reizung in verschiedenen Ablenkungswinkeln fügen, wurde schon oben angedeutet.

Dieses sogenannte Reizmengengesetz scheint von großer Bedeutung für viele Teilvorgänge von Reizvorgängen zu sein. Fanden wir es doch auch schon beim Phototropismus gültig. Bei dem „Alles oder Nichts"-Typus wird allem Anschein nach wenigstens auch durch die zugeführte Reizmenge entschieden, ob die Reaktion ausgelöst wird oder nicht.

η) Einfluß der Reizmengen auf die Reizvorgänge. Freilich ist es nicht wahrscheinlich, daß es selbst für die Präsentationszeiten allgemeingültig ist. Für das menschliche Auge gilt es nur innerhalb sehr enger Grenzen; für die Wirkungen von Wechselströmen auf motorische Nerven beim Frosch, auf sensible Nervenendigungen in der Haut des Menschen und auf den Muskel sowie auf die Blätter von Mimosa scheint es nicht zu gelten

(vgl. z. B. Pütter, Vergleichende Physiologie 1911, S. 505). Auch beim Geo- und beim Phototropismus kann es nur innerhalb bestimmter Grenzen zutreffen. Theoretisch wird seine untere Grenze mindestens durch den absoluten Intensitätsschwellenwert, seine obere mindestens durch den absoluten Zeitschwellenwert bestimmt. Die bisherigen Untersuchungen lassen noch kein sicheres Urteil darüber zu, ob praktisch aber die Grenzen nicht noch enger, etwa wie beim menschlichen Auge, gezogen sind. Bach hatte jedenfalls beobachtet, daß bei Versuchen mit verschiedenen Zentrifugalkraftgrößen unterhalb 0,7 g bei weiterer Verkleinerung der Zentrifugalkräfte die Präsentationszeiten sehr viel mehr verlängert werden als bei Reizung in solchen Ablenkungswinkeln, in denen nach dem Sinusgesetze entsprechend große Bruchteile von g als wirksam in Betracht kommen und als demnach mit dem Reizmengengesetze sich verträgt. Dieses Ergebnis ist auch durch die Bemerkungen von Pekelharing noch keineswegs genügend aufgeklärt. Sehr leicht möglich ist es übrigens, daß die Grenzen der Gültigkeit für das Gesetz bei verschiedenen Objekten recht verschieden sind. Ueberhaupt kann ja gar nicht genug davor gewarnt werden, reizphysiologische Ergebnisse, die durch quantitative Messungen bei einer Pflanze gewonnen sind, nun sofort auf die ganze Pflanzenwelt auszudehnen.[1])

In der Folgezeit ist aber jedenfalls bei Untersuchung der Intensität des Ablaufs von tropistischen Reizvorgängen davon auszugehen, daß die zugeführte Reizmenge oft von großer Bedeutung ist, und zwar zunächst für die Reaktionsschwelle, was sich eben in der Präsentationszeit ausspricht, dann aber auch für stärkere Erregungen. Ob es aber allgemein auch für die Maximalerregungen immer allein auf die zugeführte Reizmenge ankommt, unabhängig von der Zeit, über die sich der Anlaß verteilt, ist damit noch nicht erwiesen. An und für sich ist jedenfalls mit der Möglichkeit zu rechnen, daß ein reizbares Organ ganz anders exzitativ beeinflußt wird, wenn ein sehr intensiver Anlaß wenige Sekunden wirkt, wie wenn eine gleiche Reizmenge in 1 bis 2 Stunden zugeführt wird. Ja, wir werden solche Fälle noch kennen lernen. Bei Dauerreizungen besteht begreiflicherweise dauernd eine enge Abhängigkeit zwischen dem Reizzustande und der Größe des dauernd einwirkenden Anlasses. So hat man durch Versuche mittels der Kompensationsmethode sehr wahrscheinlich machen können, daß der geotropische Reizzustand in verschiedenen Ablenkungswinkeln dauernd verschieden bleibt und zwar proportional dem Sinus des Neigungswinkels. Es ist klar, daß auch schon für längere Reizungen gelten muß, was hier für Dauerreizung gesagt wurde: daß also bei längerer Reizung die „reizbare Substanz" sich in einen bestimmten, wohldefinierbaren „Erregungs-" oder „Gleichgewichts"zustand einstellt, dessen Erreichung zwar von den zugeführten Reizmengen, dessen Erhaltung weiterhin aber nur von den wirksamen Reizintensitäten abhängt.

Viel weniger Bedeutung noch haben die Reizmengen für die geotropischen Reaktionsintensitäten. Die Reaktionsintensität spricht sich in zweierlei Weise aus: 1. in der Schnelligkeit des Krümmungsbeginnes, also der Reaktionszeit, 2. in der Stärke der Krümmung. Fassen wir zunächst die Reaktionszeiten ins Auge. Da sieht man sofort aus verschiedenen Beobachtungen, daß sie nicht durch das Reizmengengesetz beherrscht werden. Denn erstens erreichen sie ihr Minimum schon bei verhältnismäßig niedrigen Reizmengen. Bei verschiedenen Objekten nämlich ist z. B. nach Bach für die Massenbeschleunigung g die minimale Reaktionszeit schon erreicht, wenn die der Präsentationszeit entsprechende Reizmenge zugeführt ist. Doch gibt es auch Pflanzen, bei denen die Reaktionszeit durch Verlängerung der Reizung über die Präsentationszeitdauer noch vermindert wird (Avenakeimlinge Rutgers). Zweitens wird auch nach Verminderung der Massenbeschleunigung (in Zentrifugalversuchen) die Reaktion nach der kürzesten möglichen Zeit sichtbar; erst von 0,6 g abwärts bei Keimsprossen von Vicia Faba (Bach) und von etwa 0,3 g bis 0,4 g abwärts bei den Keimblättern von Avena sativa (Pekelharing) werden die Reaktionszeiten bedeutend verlängert. Auch dafür aber sind drittens nicht die zugeführten Reizmengen entscheidend. Denn gleichen, den Präsentationszeiten entsprechenden Reizmengen kommen ja verschiedene Reaktionszeiten zu! Sehr beachtenswert ist dabei ferner die Tatsache, daß auch bei diesen kleinen Massenbeschleunigungen Verlängerung der Reizung über die zugehörigen Präsentationszeiten nach Bachs Zahlen und Kurven wenigstens bei manchen Objekten nicht mehr die Reaktionszeiten nennenswert abzukürzen vermag.

[1]) Das Reizmengengesetz gilt z. B. auch nicht für die Wirkung des Lichtes auf das Längenwachstum von Keimlingen. Nach den Beobachtungen von Jacobi (Sitzber. k. k. Akad. Wiss. Wien, Math. nat. Kl, Bd. 120, I, 1911, S. 1001 ff.) ist entscheidend nicht schlechthin die Reizmenge, sondern begreiflicherweise bei längerer Einwirkungsdauer die Intensität. Jüngere Keimlinge wurden durch die größere Lichtintensität, ältere aber durch die längere Dauer der Belichtung stärker im Wachstum gehemmt.

Entscheidend also für die Reaktionszeit ist nach alledem nicht schlechthin die Reizmenge, auch nicht, daß eine der Reaktionsschwelle entsprechende Reizmenge zugeführt wird, sondern über welche Zeit die Reizmengen verteilt sind: entscheidend ist mit anderen Worten die Reizintensität. Das ist auch sehr begreiflich. Bei kleinen Intensitäten des Reizanlasses, z. B., wo die Präsentationszeiten sehr lang sind, entwickelt sich der Reaktionsvorgang so langsam, daß er nicht mehr so frühzeitig wie bei höheren Intensitäten äußerlich sichtbar werden kann. Die minimale, in der Reaktionsträgheit des Organes beruhende Reaktionszeit aber wird schon dann erreicht, wenn nach Reizungsbeginn pro Zeiteinheit viel weniger als 1 g, nämlich bei Faba 0,6 g, bei Avena 0,3 bis 0,4 g zugeführt wird. Dementsprechend sind die Reaktionszeiten für die Ablenkungswinkel 15° bis 165° nahezu gleich, d. h. minimal. Hier haben wir gleich einen Fall, wo ein wichtiger Teil des Reizvorganges nicht von der Reizmenge abhängt, sondern von ihrer zeitlichen Verteilung, d. h. von der in der Zeiteinheit zugeführten Reizmenge nach Beginn der Reizung oder mit anderen Worten von der Reizintensität abhängig ist.

Reizt man nun bei verschiedenen Massenbeschleunigungen so lange wie die Präsentationszeit beträgt, so erhält man für die Reaktionszeiten eine Kurve, die annähernd Hyperbelgestalt hat, ähnlich wie die Präsentationszeitkurve selbst. Das liegt nach Obigem wohl daran, daß die Geschwindigkeit der Reaktion von denjenigen Reizmengen abhängig ist, die pro Zeiteinheit nach Reizungsbeginn während der Präsentationszeit zugeführt werden, d. h. von den zugeführten Reizintensitäten des Reizanlasses.

Tröndle hat den Versuch gemacht, die Hyperbelform der Reaktionszeitkurve anders, nämlich so zu erklären, daß er annimmt, das Reizmengengesetz gelte auch für die Reaktionszeiten.

Er stellte folgende Ueberlegung an: Aus der Beobachtung Bachs, daß gleich große geotropische Reaktionszeiten resultieren, wenn man während der Präsentationszeit und wenn man länger reizt, könne man schließen: der Reaktionsvorgang verläuft ziemlich träge; er braucht auch nach Zuführung der reaktionsauslösenden Anlässe noch Zeit, die lediglich abhängig ist von spezifischen Besonderheiten des reagierenden Organs. Es liege nahe, anzunehmen, daß nach Zufuhr dieser minimalen für die Reaktion nötigen Reizmengen diese Zeit stets gleich lang, eine Konstante k ist. So würde sich die Reaktionszeit t zusammensetzen aus einem Zeitraum t-k, während dessen der Reizanlaß wirken muß, um Reaktion auszulösen, und aus einem Zeitraum immer konstanter Länge k, währenddessen es für die Reaktionszeit ganz gleichgültig sei, ob man noch weiter reizt oder nicht. t-k ist aber nichts anderes als ein besonderer Ausdruck für die Präsentationszeit. So könnten wir augenscheinlich das Reizmengengesetz

$$iT = i'T'$$

auch so schreiben

$$i(t-k) = i'(t'-k),$$

wo i und i' zwei Intensitäten des wirksamen Anlasses, T, T' die zugehörigen Präsentationszeiten, t, t' die zugehörigen Reaktionszeiten sind.[1])

Daß Tröndles Ueberlegungen aber nicht stimmen können, geht schon daraus hervor, daß k für gleiche, der Reaktionsschwelle entsprechende Reizmengen, die sich aber durch die Reizintensitäten und durch die Zeitdauern ihrer Einwirkung unterscheiden, ganz offensichtlich nicht konstant ist.

Jetzt verstehen wir, worauf dies beruht: nämlich, wie schon gesagt, darauf, daß für die Reaktionszeit entscheidend ist die Reizmenge, die vom Beginne der Reizung pro Zeiteinheit zugeführt wird, mit anderen Worten die Reizintensität: Sowie bei Dauerreizung eine bestimmte Reizintensität einwirkt, die nach Pekelharings und Bachs Zahlen zu urteilen, bei manchen Objekten weit unter g gelegen ist, tritt, falls die Reizung bis zur Erreichung der Präsentationszeit fortgesetzt wird, die minimale Reaktionszeit ein. Schließlich würde das Tröndlesche Gesetz auch für alle jene Objekte keine Gültigkeit beanspruchen können, bei denen die Reaktionszeiten durch Reizung, die über die Präsentationsdauerzeit fortgesetzt wird, noch verkleinert werden. Solche gibt es aber!

So steht also die Ableitung Tröndles, die auf einer Verkennung des Wesens der Präsentationszeit beruht, in der Luft. Man kann ja gar nicht vorsichtig genug in der Formulierung reizphysiologischer Gesetze vorgehen. Die meisten quantitativen Messungen sind noch mit zu vielen Fehlerquellen behaftet, von allzu vielen individuellen Abweichungen getrübt. Deshalb ist hier auch nicht auf die mancherlei mathematischen Formulierungen solcher Art einzugehen, die Maillefer neuerdings augenscheinlich auf zu wenig gesicherten Unterlagen aufgebaut hat.

Was nun die Krümmungsintensitäten betrifft, so scheinen auch sie nicht einem einfachen Reizmengengesetze zu folgen: nach

[1]) Ich habe die Ableitung etwas einfacher als Tröndle vorgenommen.

Ueberschreitung der Krümmungsschwellen nicht mehr einfach entsprechend der Zunahme der Reizmengen und damit der „Erregungen", sondern langsamer und langsamer als diese zu wachsen. Arisz beobachtete eine Zunahme der maximalen phototropischen Krümmungen bei Vergrößerung der Reizmengen nur bis zu einer Reizung mit 100 Meterkerzen-Sekunden. Ferner konnte man keine Unterschiede in den Intensitäten der geotropischen Nachwirkungen wahrnehmen, als nebeneinander Versuchspflanzen etwa eine Stunde lang in dem Ablenkungswinkel 45° und in dem Neigungswinkel 90° der Schwerewirkung ausgesetzt wurden. Trotz der Gleichheit der Reaktionen müssen aber hier, vielleicht entsprechend der Verschiedenheit der zugeführten Reizmengen, die Perzeptionsintensitäten ganz verschieden sein; denn wenn intermittierend abwechselnd auf Gegenseiten ebenso lange in diesen beiden Stellungen geotropisch gereizt wurde, so trat stets eine sehr ausgesprochene Krümmung ein zugunsten der Stellung 90°. Gleiche oder annähernd gleiche Krümmungen sind also möglich bei sehr verschiedener Größe der „Erregungen" (vielleicht besser der Perzeptionen), woraus weiter zu schließen ist, daß gleiche oder annähernd gleiche Krümmungen keinen Schluß zulassen auf Gleichheit oder geringe Verschiedenheiten der Perzeptionsakte. So wie die Reaktionszeit zum Teil ein Ausdruck ist des spezifischen Krümmungsvermögens, so ist offenbar auch die Krümmungsintensität zum Teil von diesem abhängig.

Zugleich lehrt übrigens die bei solcher intermittierenden Reizung sichtbar werdende Krümmung, daß bei der Reizung auf Gegenseiten Perzeptionsakte, nicht Krümmungen miteinander verglichen werden, woraus sich eine sehr wertvolle Möglichkeit ergibt, relative Intensitäten der „Erregungen" in Abhängigkeit von den zugeführten Reizmengen zu bestimmen (Wesen der Kompensationsmethode).

So könnte es also sein, daß das Reizmengengesetz, das jetzt im Vordergrunde des Interesses steht, trotz seiner Wichtigkeit doch vielleicht als nicht so einschneidend für die Vertiefung unserer Einsicht in den Ablauf der Reizvorgänge erkannt wird, wie heute viele denken. Daß es aber z. B. Bestimmungen der relativen Empfindlichkeit verschiedener Pflanzen gegen einen Reizanlaß und der relativen Empfindlichkeit eines Organes gegen verschiedene Reizanlässe auszuführen gestatten wird, das sei nur nebenbei erwähnt.

ϑ) Wesen der Präsentationszeit. Worin besteht nun das Wesen der Präsentationszeit? Auch darüber gibt der Geotropismus gewisse Aufschlüsse. Vielleicht darin, daß erst dann die sichtbare Krümmungsreaktion sich zu entwickeln beginnt, nachdem die „Erregung" durch Einwirkung des Reizanlasses auf ein Organ während einer bestimmten Zeit, eben der Präsentationszeit, auf eine bestimmte Höhe gebracht ist: Hat die Erregung diese Höhe erreicht, so ist die Krümmungsreaktion die Folge. Hat sie nicht diese Höhe erreicht, so klingt sie ab ohne eine Reizbewegung. Wäre diese Auffassung richtig, so wäre also die Präsentationszeit ein Maß zur Beurteilung der Perzeptionsintensität und zugleich eine Reizschwelle, und zwar für die Krümmungsreaktion.

Will man das Wesen der Präsentationszeit schärfer erfassen, so muß man versuchen, die Analyse weiter zu vertiefen. Die Krümmungsbewegung wird erst lange Zeit nach Ablauf der Präsentationszeit, nämlich nach Ablauf der Reaktionszeit, sichtbar. Also sind nach Beendigung der Präsentationszeit, d. h. nach beendigter Reizung, zunächst unsichtbare Vorgänge am Werke, die in einer u. a. auch von spezifischen Eigenschaften des Organes abhängigen Schnelligkeit auf die Reaktion hinarbeiten, d. h. die äußerlich sichtbare Bewegung vorbereiten. Nennen wir sie einmal die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung. Man kann es dabei zunächst ganz unentschieden lassen, wie sie mit den tropistischen Perzeptionsvorgängen verknüpft sind und ob sie ein Teil der eigentlichen Reaktionsvorgänge sind. Wann beginnen sie? Genau nach dem Ablaufe der Präsentationszeit oder irgendwann später?

In den Erfolgen der intermittierenden geotropischen Reizung scheint ein Weg gewiesen, auf dem sich diese Frage lösen läßt. Ebenso wie es Präsentationszeiten für Dauerreize gibt, so gibt es natürlich auch Präsentationszeiten für intermittierende Reizungen durch sehr kurze Einzelreize von viel kürzerer als Präsentationszeitdauer. Sahen wir doch, daß auch solche Reize sich erfolgreich summieren lassen. Man bezeichnet zweckmäßig hier als Präsentationszeit diejenige Zeitsumme der Einzelreizungen, bei der gerade noch eine Reizkrümmung als Nachwirkung eintritt, also unter Ausschluß der Zeitabschnitte, die die Einzelreizungen bei der intermittierenden Reizung trennen. So ist man in der Lage, die Präsentationszeiten für kontinuierliche und für intermittierende Reizung jederzeit leicht vergleichen zu können. Ebenso wie es besondere Präsentationszeiten für diese Art von Reizungen gibt, so gibt es dafür natürlich auch besondere Reaktionszeiten, die man wieder vom ersten Beginn der Reizung an rechnet. Beide hat man nun für die Epikotyle von Vicia Faba bestimmt, und zwar so, daß in aufeinanderfolgenden Versuchsreihen das

Verhältnis der Ruhepausen zu der Dauer der Einzelreize variiert wurde. Als zunächst die Ruhepausen so lang genommen wurden, wie die Einzelreizungen, das Verhältnis beider also 1:1 war, waren die Präsentationszeiten annähernd gleich denen für kontinuierliche Reizung und ebenso die Reaktionszeiten, wie überhaupt die Reizkrümmungen annähernd gleich. Daraus geht zugleich als sehr wichtiges Resultat hervor, daß intermittierende Reizung weder intensivere noch wesentlich schwächere „Erregung" zur Folge hat als entsprechend lange kontinuierliche Reizung. Man sieht, daß es für die geotropische Wirkung sowohl bei der intermittierenden, wie bei der kontinuierlichen Reizung im wesentlichen auf die Summe der Zeit ankommt, während deren die Versuchspflanzen aus der normalen Ruhelage abgelenkt sind. Ja, selbst noch in Versuchen, wo die Reizdauer sich zur Ruhezeit wie 1:5 verhielt, bei einer Dauer der Einzelreizungen von 50 Sekunden bis 1½ Minuten, entsprachen die Präsentationszeiten und die Reaktionszeiten annähernd denen bei kontinuierlicher Reizung. Erst bei dem Verhältnis 1:7 machte sich eine auffällige Verlängerung beider Zeiten geltend.

Aus diesen Beobachtungen scheint es erlaubt zu folgern, daß die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung bei intermittierender oder kontinuierlicher Reizung nicht erst nach Ablauf der Präsentationszeiten oder gar noch später nach Erreichung einer gewissen „Erregungs"-intensität einsetzen, sondern schon durch ganz kurze Reize, viel kürzer als die Präsentationszeit, geweckt werden. Würden nämlich diese unsichtbaren Vorläufer erst nach Ablauf der Präsentationszeit sich zu entfalten beginnen, dann müßten die Reaktionszeiten bei intermittierender Reizung natürlich viel länger sein als die bei kontinuierlicher Reizung.

Nehmen wir die Präsentations- und Reaktionszeiten für intermittierende Reizung 1:5 als Beispiel! Die Präsentationszeit für kontinuierliche Reizung ist nach Bach (Vicia Faba) bei 21 bis 22° ca. 6 Minuten, die entsprechende Reaktionszeit 80 bis 90 Minuten. Die Präsentationszeit für die intermittierende Reizung 1:5 ist ebenfalls 6 bis 7 Minuten. Sie wird aber infolge der Einschaltung der Ruhepausen erst nach 31 bis 37 Minuten erreicht. Würden nun jetzt erst die unsichtbaren Vorläufer der Reaktion geweckt werden, so wären wie bei der kontinuierlichen Reizung weitere 74 bis 86, rund 80 Minuten bis zum Reaktionsbeginne nötig, müßte also die Krümmung erst 111 bis 117 Minuten nach dem Beginne der Reizung sichtbar werden. Tatsächlich aber trat sie wie die kontinuierliche, entsprechend lange Reizung schon nach 75 bis 90 Minuten ein. Daraus läßt sich schließen: Diese Tatsachen werden nur verständlich, wenn man annimmt, daß die Vorläufer der Krümmung schon vor dem Ablaufe der Präsentationszeit, also durch kürzere Einzelreize, in ihren Anfängen geweckt und durch jeden neuen Einzelreiz verstärkt werden. Wahrscheinlich beginnen sie schon nach sehr kurzer Reizung. Die gleichen Schlüsse lassen sich übrigens aus den geotropischen Reaktionszeiten bei kontinuierlicher Reizung durch Zentrifugalkräfte von Präsentationszeitdauer ziehen: Wenn auch die Präsentationszeiten (entsprechend verschiedenen Zentrifugalkräften) ganz verschieden sind, so können doch innerhalb weiter Grenzen der Fliehkraftgrößen die Reaktionszeiten gleich sein. Das wäre aber unmöglich, würden die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung erst nach dem Ablaufe der Präsentationszeiten ausgelöst werden.

Sonach ließe sich also die Präsentationszeit weder mit der Perzeptionszeit identifizieren, noch ließe sie sich definieren als derjenige Zeitraum, während dessen ein kontinuierlicher oder intermittierender Reiz auf die Pflanze einwirken muß, um die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung und damit die Reaktion zu wecken. So bleibt also nur für andere Auffassungen Raum. Werden die ersten Anfänge der Krümmungsvorläufer schon durch Reize geweckt, die kürzer als die Präsentationszeit dauern, so kommt bei Reizung von kürzerer als Präsentationszeitdauer die Reizbewegung offenbar nur deshalb nicht zustande, weil diese Anfänge infolge ungenügend intensiver oder ungenügend langer Perzeption nicht stark genug werden, um bis zum Beginne der sichtbaren Krümmung sich weiter entwickeln zu können. Das Gleiche dürfte der Fall sein, wenn bei selbst sehr lange Zeit fortgesetzter intermittierender Reizung wegen des zu großen Mißverhältnisses zwischen Einzelreizdauern und Ruhepausen keine Reizkrümmung mehr ausgelöst wird. Bei solcher intermittierender Reizung werden die Perzeptionsvorgänge nicht intensiv genug, weil sie in den Ruhepausen zum Teil wieder abklingen. Wenn wir bei intermittierender Reizung durch Verlängerung der Ruhepausen zwischen den Einzelreizen feststellen suchen, bei welchem Verhältnisse der Reize zu den Pausen auch bei noch so langer Fortsetzung der Reizung gerade eben kein Erfolg, keine Reizkrümmung mehr veranlaßt wird, mit anderen Worten, wenn wir das Relaxationsverhältnis ermitteln, so stellen wir, scheint es, gerade test, bei welchem zeitlichen Verhältnisse der Reize zu den Pausen die Perzeptionsvorgänge zu gering bleiben, um die

Vorläufer der Krümmung bis zum Krümmungsbeginne sich entwickeln zu lassen. Uebrigens klingen, zum mindesten bei sehr langen Pausen zwischen den Einzelreizen, auch die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung wieder ab.

Sind alle diese Ueberlegungen richtig, so würde die Präsentationszeit die Reizmenge angeben, die erforderlich ist, um die Intensität der Perzeptionsvorgänge auf solche Höhe zu bringen, daß sie die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung bis zur Weckung der sichtbaren Krümmung erstarken lassen.

Es scheint aber zum mindesten fraglich, ob damit die Präsentationszeit für alle tropistischen Vorgänge zutreffend definiert ist. Viele Reizkrümmungen entwickeln sich sehr träge, so z. B. die tropistischen Krümmungen der Grasknoten und noch mehr die verholzter Stämme. Es ist doch recht unwahrscheinlich, daß ein solcher Stamm sich geotropisch, vielleicht nach einem Jahre krümmen würde, nachdem man ihn eine Stunde oder gar einen Tag mit noch so hohen Schleuderkräften gereizt hätte! Die Trägheit des Reaktionsvermögens ist es hier offenbar, die den Krümmungsbeginn beherrscht: die Krümmung tritt hier jedenfalls nicht schlechthin dann ein, wenn die Perzeptionsvorgänge auf eine gewisse, sagen wir die maximale Höhe gebracht sind, weil eben die Perzeptionsvorgänge infolge der Trägheit der Reaktionsvorgänge nach beendigter Reizung wieder abklingen würden, ehe sie die Reaktion soweit entwickelt haben, daß die sichtbare Krümmung erfolgt. Vielleicht kommt es in solchen Fällen zur Auslösung der Reaktion viel mehr darauf an, daß die Perzeptionsvorgänge eine gewisse Zeitlang in einer bestimmten Intensität gehalten, als daß sie auf eine bestimmte Höhe gebracht werden. Solche Beispiele gaben den Anlaß, darauf hinzuweisen, daß die Präsentationszeit nicht allein von der Perzeption, sondern auch vom Reaktionsvorgange abhängig sein könne. Bei allen Reizvorgängen könnte also entscheidend sein für die Präsentationszeit: 1. die Trägheit der Perzeption und 2. die Trägheit der Reaktionsvorgänge.

ι) Abstumpfung durch starke Reizung. Auch für den Geotropismus ist es ganz kürzlich gelungen, in Versuchen mit hohen Zentrifugalkräften sonst positiv geotropische Wurzeln von Lupinus, Phaseolus und Helianthus zu, wie es scheint, negativ geotropischen Krümmungen zu zwingen, und zwar durch Reizmengen, die rund 1000mal so groß sind wie die positive Reaktion auslösenden.

2e) Haptotropismus. Dieser Tropismus, auch Thigmotropismus genannt, findet sich in ausgesprochener Weise ausgebildet bei einer Klasse von Kletterpflanzen (Lianen) und bei Insektivoren. Man versteht darunter die tropistische Empfindlichkeit gegen Berührungsreize, sogenannte Kontaktreize, die die empfindlichen Organe einseitig treffen. Während in der Regel geotropisch oder phototropisch empfindlich alle oder fast alle Teile einer Pflanze sind, ist die haptotropische Empfindlichkeit meist auf kürzere Strecken oder auf besondere Organe beschränkt. Sie dient, wo sie stark ausgebildet ist, ebenso wie der Photo- und Geotropismus, sehr wichtigen Lebensbedürfnissen der betreffendenPflanzen. Die haptotropische Empfindlichkeit befähigt die empfindlichen Organe, den Körper, der sie berührt, zu fassen, zu ergreifen. Dadurch wird es den sogenannten Rankenpflanzen (oder Rankenkletterern) ermöglicht, mit ihren schwanken Sprossen, die sich selbst nicht tragen können, vom Boden an anderen Pflanzen zum Licht emporzuklettern, mit ganz anderen Mitteln also wie die Schlingpflanzen. Während die letzteren auf senkrechte oder nur wenig geneigte Stützen angewiesen sind, können sich die Rankungspflanzen an Stützen jeder beliebigen Richtung verankern.

α) Ranken. Das höchste Maß von Haptotropismus findet man eben bei den besonderen Kletter- oder Greiforganen dieser Rankenpflanzen, den Ranken. Es sind das verzweigte oder unverzweigte fadenförmige dünne Seitenorgane, die entweder umgewandelte Blätter oder Blattteile oder umgebildete Stengelorgane sind. Die Orte, die sie an der Pflanze einnehmen, geben meist Aufschluß über ihre morphologische Wertigkeit. Blattranken haben z. B. Cobaea, Pisum und andere Leguminosen; Stengelranken Passiflora, viele Cucurbitaceen, Vitis und Ampelopsis. Bei vielen Blattranken ist nur die Blattspitze (Gloriosa) oder sind nur die letzten Fiederblättchen als Fadenranken ausgebildet und mit Kontaktempfindlichkeit begabt.

Wenige Sekunden oder Minuten nach Beginn der Reizung pflegt die Einkrümmung beendigt zu sein, die manchmal schon nach 5 bis 20 Sekunden beginnt. Anders dürfte es auch nicht sein, soll die Ranke die Stütze, die sich ihr bei ihrer autonomen kreisenden Nutationsbewegung in den Weg stellt, sicher erfassen und umwickeln. Die Verschiedenheiten in der Schnelligkeit der Reizbeantwortung sind eng abhängig von den sonstigen Eigentümlichkeiten der Pflanzen: Rankenpflanzen mit sehr dünnen, vom Winde leicht bewegbaren Sprossen und sehr lebhaft zirkumnutierenden Ranken, wie z. B. Cyclanthera, Sicyos u. a., fassen mit ihren Ranken schneller zu als solche mit dicken Stengeln und schwach nutierenden Ranken, wie z. B. Vitis oder Ampelopsis.

Werden diese mit haptotropischer Reizbarkeit ausgestatteten Organe berührt, so pflegen sie sich einige Zeit danach zu krümmen und zwar so, daß die berührte Stelle konkav wird, wie es ja für das Erfassen einer Stütze auch nötig ist. Von solchen allseits haptotropischen Ranken verschieden verhalten sich solche, die physiologisch, oft auch morphologisch dorsiventral sind. Die Ranken vieler Cucurbitaceen, von Passiflora u. a. lassen schon äußerlich in ungereiztem Zustande eine Oberseite, eine Unterseite und zwei Flanken erkennen. Die Spitze pflegt ein wenig nach der Unterseite hin eingekrümmt zu sein. Nur wenn die Unterseite berührt wird, tritt, oft nach überraschend kurzer Zeit, eine sehr ausgesprochene Reizkrümmung nach der Unterseite hin ein. Berührt man die Flanken, so erfolgt eine reine Seitenkrümmung, die meist sehr viel schwächer ausfällt als jene. Berührung der Oberseite schließlich hat überhaupt keine, oder doch nur eine ganz minimale Reizkrümmung zur Folge. Diese Ranken nennt man zum Unterschiede von den allseitig haptotropischen Organen und Ranken (z. B. Cobaea, Eccremocarpus u. a.), „einseitig" oder besser „nicht allseits" haptotropisch.

Früher unterschied man auf Grund dieser Verschiedenheit nach Ch. Darwins Vorschlag „allseitsempfindliche" und „einseits empfindliche" Ranken. Die „einseits empfindlichen" Ranken sind aber trotz ihrer Unterschiede im Reaktionsvermögen der verschiedenen Seiten nicht weniger allseits kontaktempfindlich als die allseits empfindlichen. Reizt man bei einer „allseits empfindlichen" Ranke einander gegenüberliegende Seiten gleich stark, so bleibt jede Reizkrümmung aus wie beim Photo- oder Geotropismus. Bei den einseits empfindlichen sollte man nun meinen, daß die Reizung der sogenannten unempfindlichen Oberseite keinen Einfluß haben könnte auf den Erfolg, der bei Reizung der Unterseite eintritt. Der Versuch zeigt aber das Gegenteil: auch hier bleibt die Krümmung aus, wenn man außer der Unterseite die Oberseite reizt. Ja die Kontaktempfindlichkeit der Oberseite ist meist nicht einmal schwächer als die der Unterseite; denn eine Reizung der Unterseite wird in ihrer Wirkung durch eine gleich starke Reizung der Oberseite völlig aufgehoben.

β) Insektivoren. Anderen Zwecken wie bei den Rankenpflanzen dient die Kontaktempfindlichkeit bei verschiedenen insektivoren Pflanzen: zum festeren Erfassen und Umfassen gefangener Insekten. So vor allem bei vielen Arten der Gattung Drosera, wie auch bei Pinguicula. Berührt man an den Blättern von Drosera das Köpfchen eines der randständigen Blatttentakeln, so krümmt sich der Tentakelstiel radial nach dem Blattzentrum einwärts, gleichgültig, wie es scheint, welche Seite des Köpfchens gereizt wird. Hier haben wir es also mit einer nastischen, nicht einer tropistischen Kontaktkrümmung zu tun. Der Reiz breitet sich nun aber von dem gereizten Tentakel über das Blatt aus und veranlaßt auch andere benachbarte Tentakeln, sich zu krümmen. Diese indirekt gereizten Tentakeln bewegen sich nun nicht rein radial einwärts, sondern mehr oder weniger nach der Befestigungsstelle des primär gereizten Tentakels hin, in ihrer Bewegungsrichtung sonach beeinflußt von der Richtung, aus der der Reiz zu ihnen gelangt. Die Bewegung ist also tropistischer Art oder doch wenigstens eine Kombination von Tropismus und Nastie.

Bei Pinguicula besteht die Reaktion lediglich in einer Einkrümmung der Blattfläche: Man kann im Zweifel darüber sein, ob hier nicht auch eine Nastie vorliegt.

Ranken von Sicyos angulatus werden noch durch die geringe Reibung gereizt, die durch ein Baumwollfädchen von 0,00025 mg Gewicht, als Reiterchen den Ranken aufgesetzt, verursacht wird. Baumwollschleifen von 1 bis 10 mg Gewicht genügen auch bei weniger empfindlichen Ranken und den reizbaren Blattstielen (Pfeffer).

Darwin beobachtete Krümmungen bei Droseratentakeln, als er auf das Tentakelköpfchen ein Haarstückchen von 0,000822 mg Gewicht legte.

γ) Wesen der Kontaktperzeption. Beruht die Geoperzeption vielleicht auf einer inneren Druckwirkung, so erscheint die Frage berechtigt, ob die Kontaktreizperzeption nicht auf eine Druckwirkung von außen zurückgeführt werden kann. Pfeffer hat aber gezeigt, daß die Kontaktreizung überhaupt nicht durch statischen Druck bewirkt wird. Schon Darwin war es aufgefallen, daß die Tentakeln von Drosera durch aufschlagende Wassertropfen nicht gereizt werden. Pfeffer verdanken wir alsdann den Nachweis, daß die Ranken und die Droseratentakeln nur durch Berührung und Reibung mit festen Körpern perzipieren. Die Berührung oder Reibung mit einer Flüssigkeit (Quecksilber, Wasser) oder Luft, ja selbst heftige Stöße mit Wasser- oder Quecksilberstrahlen und ebenso heftige Zerrungen durch Wind aber bleiben ganz ohne Erfolg. Sowie man in der Flüssigkeit feste Bestandteile, wenn auch in sehr feiner Verteilung, aufschlämmt, tritt Reizung ein. Ebensowenig wirksam ist, wenn man die empfindlichen Organe mit 5 oder 10 % Gelatinegallerte reibt. Man kann mit Glasstäben, die mit solcher Gallerte überzogen sind, die empfindlichsten Ranken anfassen und biegen

oder schlagen, ohne daß eine Reizung erfolgt. Auch lösen weder kleine noch große Stöße mittels solcher Stäbe Reaktion aus. Verwendet man zur Reizung feste Körper, so fällt auf, daß Reiben mit rauhen Körpern wirksamer ist als mit sehr glatten. Doch ist auch bei festen Körpern statischer Druck wirkungslos.

Durch alle diese Besonderheiten unterscheidet sich die Kontaktreizbarkeit scharf von der Stoß- oder Erschütterungsreizbarkeit. Pfeffer zieht infolgedessen eine Parallele zwischen der Kontaktempfindlichkeit und der Tastreizbarkeit unserer Haut. Er sagt: „Zur Erzielung einer Reizung müssen in der sensiblen Zone der Ranke diskrete Punkte beschränkter Ausdehnung gleichzeitig oder in genügend schneller Aufeinanderfolge von Stoß oder Zug hinreichender Intensität betroffen werden. Dagegen reagiert die Ranke nicht, sobald der Stoß alle Punkte eines größeren Flächenstücks mit ungefähr gleicher Intensität trifft, so daß also die Kompression benachbarter Punkte erhebliche Differenzen nicht erreicht.“ Auch bei der Haut wird die Reizung nur dann bewirkt, „wenn durch den Druck an einzelnen Punkten eine localisierte Deformation, also ein steiles Druckgefälle hergestellt wird.“ „Im allgemeinen ist also die sensorische Erregung von der Größe der Druckfläche, von der Tiefe, der Geschwindigkeit und dem Wechsel der Deformation abhängig.“ Die Reizung der Oberseite nicht allseits haptotropischer Ranken beruht übrigens auch auf Kontaktreiz.

Haberlandt hat später die Hypothese ausgesprochen, das Wesen der Kontaktreizung bestehe darin, daß eine tangentiale Dehnung der Hautschichte des Protoplasmas als Reiz perzipiert werde, während eine Kompression des Plasmas durch streng radialen Druck wirkungslos sei. Demgegenüber ist aber darauf hinzuweisen, daß durch so hohe tangentiale Spannungen, wie sie mit sehr heftigen Biegungen der Ranken nach der Ober- oder nach der Unterseite verbunden sind, keine Reizkrümmungen ausgelöst werden, wohingegen, wie schon erwähnt, ein Fädchen von 0,00025 mg Gewicht wirksam ist, vorausgesetzt, daß es, etwa durch Luftzug, bewegt wird.

2f) Rheotropismus. Während die haptotropische Reaktion nur durch Berührung der reizbaren Stellen mit festen Körpern, aber z. B. nicht durch Wasser- oder Quecksilberstrahlen ausgelöst werden kann, gibt es eine besondere Orientierungsbewegung, die durch die Strömungsrichtung fließenden Wassers veranlaßt wird. Man nennt sie Rheotropismus. Bringt man Wurzeln in strömendes Wasser, so beobachtet man bei vielen Arten, z. B. von Vicia sativa oder Zea Mays (manche andere freilich sind unempfindlich), daß sich die Wurzelspitze gegen den Strom, also positiv krümmt.

Auch für diesen Tropismus braucht der wirksame Reizanlaß nicht sehr intensiv zu sein. Nach Juel krümmen sich Keimwurzeln von Vicia sativa bereits gut, wenn das Wasser in der Sekunde nur 0,3 mm zurücklegt (ebenso Newcombe für Crucjferenwurzeln). Dagegen ist bei Keimwurzeln von Zea Mays die Schwelle erst bei 3 mm pro Sekunde erreicht.

2g) Traumatotropismus. Dieser Tropismus bietet ein besonderes Interesse dar; denn er wird ausgelöst durch einseitige Verwundungen. Ch. Darwin hat diese eigenartige Reaktionsbefähigung bei Wurzeln entdeckt. Als er Vegetationspunkte von Keimwurzeln durch Schnitte, Stiche, Versengung, chemische Einflüsse einseitig schädigte, trat in der Wachstumszone, also in einiger Entfernung von der geschädigten Stellen eine Krümmung ein, die von der Wundstelle hinweg gerichtet war: die Reaktion ist eine negativ traumatotropische Bewegung. Sie ist bei Erd- und Luftwurzeln weit verbreitet. Der Traumatotropismus scheint aber nicht auf sie beschränkt zu sein.

2h) Kamptotropismus. Ein eigenartiger Tropismus, der noch fast gar nicht näher studiert ist. Fr. Darwin beobachtete bei Sorghumkeimlingen, daß nach einer mechanischen Biegung des Keimblattes das hypokotyle Glied sich in gleichem Sinne konkav, also positiv, krümmt. Etwas Aehnliches kommt bei Wurzeln vor. Zwingt man ihre Spitzen in gebogenen Glasröhrchen zu wachsen, so treten in den außerhalb der Röhrchen befindlichen Wachstumszonen Krümmungen auf, die der Spitzenkrümmung gleichgerichtet sind. Cholodnyi macht die plausible Annahme, daß die Krümmung durch die mechanische Deformation und die damit verbundene abnorme Gewebespannung ausgelöst wird. Ich möchte für solche aktive tropistische Krümmungen, die durch mechanische Deformationen veranlaßt werden, den Namen Kamptotropismus vorschlagen. Mit Haptotropismus scheinen sie ebensowenig wie mit Traumatotropismus etwas zu tun zu haben. Während man diese mit der Deformation gleichgerichteten Krümmungen als positiv bezeichnen muß, gibt es ganz allgemein bei wachstumsfähigen Organen auch negative, die auf den Ausgleich einer mechanischen Deformation gerichtet sind. Man hat diese Bewegungen bisher stets als autotropische angesehen. Positiver Kamptotropismus kommt übrigens vielleicht nach eigenen gelegentlichen Beobachtungen auch bei Ranken vor.

2i) Osmotropismus. Eine tropistische Reaktionsbefähigung ist auch festgestellt

worden gegenüber konzentrierteren Lösungen, nicht veranlaßt durch ihre chemische Qualität, sondern durch den osmotischen Druck der Lösungen. Der Osmotropismus ist also streng von dem weiterhin noch zu behandelnden Chemotropismus zu scheiden. Möglicherweise schließt er sich dem Kamptotropismus näher an. Jedenfalls aber wurde bisher nur negativer Osmotropismus und zwar bei Pilzhyphen und Pollenschläuchen beobachtet.

2k) Chemotropismus. Eine größere biologische Bedeutung als dem zuletzt besprochenen Tropismus kommt dem Chemotropismus zu. Er wird ausgelöst durch die ungleiche Verteilung wirksamer chemischer Substanzen in der Umgebung der reizbaren Organe. Chemisch wirksam sein können aber Gase, Wasserdampf oder in Wasser lösliche Körper. Reizkrümmungen, die durch anhomogene Verteilung von Gasen ausgelöst werden, bezeichnet man meist mit einem Sondernamen als aerotropische oder „aeroido"-tropische Reaktionen; Krümmungen, die durch ungleiche Verteilung von Wasserdampf veranlaßt werden, als hydrotropische. Für den Rest bleibt der Ausdruck chemotropisch reserviert, falls die Reaktionen durch die Qualität der chemischen Verbindungen ausgelöst werden. Vom Chemotropismus streng zu scheiden ist der Osmotropismus. Er wird lediglich veranlaßt durch den osmotischen Druck wässeriger Lösungen unabhängig von ihrer chemischen Qualität (siehe oben).

α) Hydrotropismus. Daß Wurzeln sich nach feuchten Bodenstellen hin krümmen können, ist seit langem bekannt. Genauer untersucht hat diese Erscheinung aber erst Sachs. Er füllte einen Zylinder, der unten mit grobem Tüll überzogen war, mit feuchtem Sägemehl an und stellte ihn so schräg, daß die Tüllschichte einen Winkel von 30 bis 45° mit dem Horizonte bildete. Die Keimwurzeln von Erbsen, die in diesem Apparate zur Keimung gebracht wurden, wuchsen zunächst positiv geotropisch zwischen den Tüllfäden aus dem Sägemehl hervor, um sich dann aus der trockenen Luft durch positive hydrotropische Krümmungen dem Tüllgewebe anzuschmiegen und ihm entlang weiter zu wachsen. Nur wenn die Luft relativ trocken war, krümmten sich die Wurzeln in dieser Weise hydrotropisch. Ebenso vorteilhaft ist für die Pollenschläuche positiver Hydrotropismus: Hier wird dadurch das Eindringen in das Narbengewebe und den Griffelkanal begünstigt. Neben positivem Hydrotropismus kommt auch negativer vor.

β) Aerotropismus. Aerotropismus ist ebenso verbreitet wie der Hydrotropismus und, wie es scheint, auch nicht ohne ökologische Bedeutung. Eine Reihe von Luftgasen, wie Sauerstoff und Kohlensäure, sind ja für die Ernährung der Pflanze von größter Wichtigkeit. Daher scheint es begreiflich, wenn manche Pflanzenorgane durch entsprechende Krümmungen befähigt sind, Stellen des Substrates, die an einem solchen Gase zu arm sind, zu meiden und günstigere aufzusuchen. Gleichgültig scheint es dabei, ob die Gase als solche oder in Wasser gelöst in Betracht kommen. Positiv aerotropisch sind zunächst viele Wurzeln.

Auch Sprosse scheinen manchmal aerotropisch zu sein. Während Sammet bei solchen keine derartigen Krümmungen hatte beobachten können, gibt W. Polowzow an, die Keimstengel von Brassica Napus, Brassica rapa, Helianthus annuus u. a. seien gegen Sauerstoff und Kohlensäure, nicht aber gegen Wasserstoff und Stickstoff empfindlich. Diese Forscherin ließ die Gase aus porösen Tonröhren mit bestimmter Geschwindigkeit einseits gegen die Versuchspflanzen diffundieren. Die Krümmungen gegen Sauerstoff waren positiv in schwachen, negativ in stärkeren Diffusionsströmen. Das gleiche Ergebnis hatten Versuche mit Kohlensäure. Doch bedürfen die Beobachtungen Polowzows dringend der Bestätigung. Negative Krümmungen erzielte ferner Sammet an Sprossen und Keimscheiden von Hafer und Weizen durch Aether, Alkohol, Ammoniak.

Negativ aerotropisch sind auch manche Pollenschläuche gegen Sauerstoff; negativ gegen Kohlensäure nach Polowzow auch die Sporangienträger von Phycomyces; positiv gegen Sauerstoff die Keimschläuche aller untersuchten Mucoraceen.

γ) Chemotropismus im engeren Sinne des Wortes. Chemotropismus im engeren Sinne des Wortes ist im Pflanzenreiche offenbar weit verbreitet. Freilich widersprechen sich die Literaturangaben im einzelnen in so vielen Punkten, daß es nur schwer möglich ist, hervorzuheben, was als gesicherte Tatsache zu gelten hat. Ueber jeden Zweifel erhaben ist der Chemotropismus der Blatttentakeln bei Drosera. Darüber gilt ganz das gleiche, was zuvor über den Haptotropismus der Tentakeln gesagt wurde. Doch wirken chemische Reize, wie z. B. Eiweiße, Ammoniaksalze, Phosphate im allgemeinen weit intensiver als Berührungsreize. Die Krümmungen werden auch ausgelöst durch viele Stoffe, die für das Blatt ganz ohne Bedeutung oder gar schädlich sind, wie Sublimat. Oekologisch sind die chemotropischen Bewegungen bei Drosera ebenso verständlich wie die haptotropischen.

Pollenschläuche. Ausgesprochen chemotropisch reagieren ferner sehr viele Pollenschläuche. Läßt man Pollen z. B. von Scilla patula auf steriler Gelatine keimen; in die eine Samenknospe oder ein Narbenstückchen der gleichen Pflanze

eingeschlossen ist, so wachsen die Pollenschläuche darauf zu und in das betreffende Gewebe hinein. Die Schläuche werden dabei nicht etwa durch seltene und spezifische Stoffe gelenkt, sondern durch allgemein im Organismus verbreitete Verbindungen: wie Kohlenhydrate (Lävulose, Dextrose, Dextrin, Laktose und vor allem Rohrzucker) oder Eiweißstoffe (Albumine, Globuline, Nukleoalbumine, Glukoproteide, Diastase u. a.). Und zwar scheint die Mehrzahl der Pollenschläuche sowohl gegen die eine als auch gegen die andere Körpergruppe empfindlich zu sein.

Der Chemotropismus der Pollenschläuche ist eines der wichtigsten Mittel, die Schläuche von der Narbe durch den Griffelkanal zu den in den Fruchtknoten eingeschlossenen Samenanlagen zu leiten.

Pilzhyphen. Das Verhalten mancher Pilzhyphen legte den Gedanken nahe, daß auch ihnen ein Chemotropismus zukommen müsse und daß dieses Reaktionsvermögen von ökologischer Bedeutung sei. Schon de Bary hatte vermutet, daß die parasitischen Pilze durch eine solche Reizbarkeit befähigt würden, in ihre Wirtspflanzen einzudringen. Auf eine solche Reizbarkeit weist auch der Wuchs von Pilzmycelien in festen Nährböden, wie z. B. Gelatine hin: das Mycelium breitet sich von der Stelle, wo die Spore keimte, allseitig gleichmäßig in Kreisform oder, falls die Nährschichte dick ist, in Kugelform aus, indem sich alle Hyphen mehr oder weniger in radiale Richtung einstellen.

Miyoshi fand für verschiedene Schimmelpilze ausgesprochen positiven Chemotropismus gegenüber Phosphaten, Ammoniaksalzen, Rohrzucker, Traubenzucker, Pepton, Asparagin und Fleischextrakt, während sie indifferent sich gegen manche andere Stoffe verhielten. NegativerChemotropismus machte sich bemerkbar gegenüber freien organischen und anorganischen Säuren, Alkalien, Alkohol, Kalisalpeter, Magnesiumsulfat u. a. Daß sich nicht alle Pilze gleich verhielten, erscheint mit Rücksicht auf die Verschiedenheiten in ihrer Ernährungsweise und ihren Lebensbedingungen begreiflich. Das gilt für Saprolegnia auf der einen Seite, die Mehrzahl der untersuchten Schimmelpilze auf der anderen Seite. Wenn der Chemotropismus hier zweifellos dazu befähigt, Quellen geeigneter Nahrungsstoffe aufzusuchen, so konnte man doch feststellen, daß auch solche Stoffe gute Lockmittel sein können, die keinen Nährwert haben, und das umgekehrt Stoffe von hohem Nährwerte, wie z. B. Glyzerin, unwirksam sind.

Zu ganz anderen Ergebnissen sind freilich neuerdings andere Forscher gelangt: Clark sowohl wie Fulton. Beide fanden bei Schimmeln niemals ausgesprochenen positiven Chemotropismus bei Verwendung von Nährlösung, Nährsalzen oder anderen chemischen Verbindungen. Durch die neueren negativen Erfolge der zuletzt genannten Forscher wird freilich das Vorhandensein des Chemotropismus bei den Pilzen nicht in Frage gestellt: Denn Clark und Fulton beobachteten negativen Chemotropismus gegenüber noch unbekannten Stoffen, die von den Hyphen selbst gebildet und ausgeschieden zu werden scheinen.

Wurzeln. Weitere Organe endlich, bei denen ein Chemotropismus vermutet werden konnte, sind die Wurzeln der höheren Pflanzen. Wie für die Pilzhyphen würde es für sie sehr vorteilhaft sein, wenn sie sich von nährsalzarmen Bodenpartien zu nährstoffreicheren wenden könnten. Eine ganze Reihe von Forschern, die über diese Frage in den letzten Jahren experimentell gearbeitet haben, spricht sich denn auch dahin aus, daß die Wurzeln tatsächlich gegen manche Stoffe positiv, gegen andere negativ chemotropisch reagieren. Doch widersprechen sich diese Autoren in ihren Beobachtungen so sehr und die Fehlerquellen bei solchen Untersuchungen an Wurzeln sind so groß, daß schwer ein Urteil darüber möglich ist, welche Angaben als einwandfrei betrachtet werden können.

δ) Die Perzeptionsart. Zweifellos liegt nicht allen Chemotropismen ein einheitlicher Perzeptionsakt zugrunde. So beruht z. B. die Empfindlichkeit der Pollenschläuche gegen Eiweißstoffe auf einer anderen Sensibilität als die gegen Zuckerarten. Ferner spricht für eine Verschiedenheit der Perzeptionsvorgänge beim Hydro-, Aero- und Chemotropismus im engeren Sinne, daß nicht alle Organe, die einen dieser Tropismen ausgebildet zeigen, zugleich auch beide anderen Tropismen besitzen.

Was den Hydrotropismus betrifft, so unterscheidet sich vielleicht die Perzeption ganz prinzipiell von der beim Aero- und Chemotropismus. Vielleicht ist beim Hydrotropismus der eigentliche Reizanlaß die Verminderung der Transpiration und die hiermit verbundene Erhöhung des Turgordruckes in den Zellen, die besonders von Wasserdampf umspült werden. Dann würde sich der Hydrotropismus mehr dem Osmotropismus als dem Chemotropismus anschließen.

Für den Aerotropismus und den Chemotropismus im engeren Sinne des Wortes läßt sich ohne eingehende Untersuchung auch nicht sagen, ob die wirksamen chemischen Körper direkt oder nur ganz indirekt, durch irgendwelche auslösend wirkende Veränderungen des Lebensgetriebes in den affizierten Zellen, für die Perzeption von Bedeutung sind. Fest steht nur so viel, daß

verschiedene chemische Körper auch verschiedene Chemoperzeptionen nach sich ziehen können. Beim Chemotropismus ist die Wirkung der dissoziierten Ionen und die der nicht dissoziierten Moleküle natürlich getrennt zu untersuchen.

ε) Intensitätsschwelle. Die Intensitätsschwellen für den Chemotropismus liegen außerordentlich tief: Die Tentakeln von Drosera rotundifolia krümmten sich bereits, als Darwin auf das Köpfchen eines derselben einen Wassertropfen brachte, der nur 0,000423 mg Ammoniumphosphat enthielt. Für Ammoniumnitrat ist die Schwelle 0,0025 mg, für Ammoniumcarbonat 0,0675 mg. Auf Penicillium- und die Hyphen anderer Pilze wirken merklich 0,01 % Phosphate, Ammoniaksalze u. a., auf Saprolegnia 0,005 % Fleischextrakt.

ζ) Abstumpfung durch den Reizanlaß. Auch beim Chemotropismus scheinen abstumpfende Wirkungen der Reizanlässe vorzukommen. Die chemotropische Erregung hängt nämlich davon ab, ob sich das reizbare Organ in einer homogenen Lösung des Reizstoffes befindet oder nicht. Miyoshi hat beobachtet, daß bei Pollenschläuchen jedesmal die fünffache, bei Hyphen von Saprolegnia dagegen jedesmal die zehnfache Konzentration gegenüber einer homogenen, die reizbaren Organe umspülenden Lösung nötig ist, um gerade eben chemotropische Reaktion auszulösen. Das würde aber dem Weberschen Gesetze entsprechen, das für die Beziehung zwischen Reizgröße und subjektiver Empfindung bei vielen Reizvorgängen des Menschen gilt. Dieses Gesetz sagt nämlich aus, daß zwischen dem schon wirksamen Reizanlaß und dem Reizzuwachs immer ein und dasselbe Verhältnis hergestellt werden muß, um denselben Erfolg auszulösen. Freilich bedürfen diese Beobachtungen Miyoshis, wie wir schon früher sahen, weiterer Nachprüfung. Daß das Gesetz für die Chemotaxis gilt, hat Pfeffer bewiesen.

Ueber die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes bei der tropistischen Unterschiedsempfindlichkeit vgl. den Abschnitt über das Gegeneinanderwirken zweier tropistischer Reizungen (Abschnitt 7).

2l) Galvanotropismus. Auch der elektrische Strom, der durch Flüssigkeiten fließt, kann Anlaß zu bestimmt gerichteten Krümmungen werden. Sie sind beobachtet worden an Wurzeln, die in solchem Wasser wachsen. Die Krümmungsrichtung hängt von der Stromdichte ab: höhere Stromdichten bewirken positive, niedere negative Krümmungen. Die positiven Reaktionen sind keine Reizreaktionen, sondern Folge einer einseitigen Schädigung der Wurzeln durch den Strom. Die negativen Krümmungen, die man als galvanotropische bezeichnen kann, scheinen dagegen echte Reizreaktionen zu sein, die aber zum Teil vielleicht nur sehr indirekt durch den Strom ausgelöst werden, vielmehr möglicherweise in Wirklichkeit traumatotropischer oder chemotropischer Art sind.

Ganz ungeklärt sind auch die Ansichten darüber, was als Reizanlaß wirkt. Manche Forscher, wie Gaßner, sind der Meinung, daß der Galvanotropismus eigentlich nur Traumatotropismus sei; andere wieder halten ihn für Chemotropismus. Sollte es sich bewahrheiten, daß die galvanotropische Empfindlichkeit streng auf die Wurzelspitze beschränkt ist, so könnte er weder das eine noch das andere sein, sondern wäre ein Tropismus eigener Art mit besonderem, näher zu analysierendem Reizanlasse.

2m) Autotropismus. Allen den besprochenen, durch anhomogene Verteilung von Außenfaktoren ausgelösten Tropismen steht eine Gruppe höchst interessanter und wichtiger tropistischer Erscheinungen gegenüber von allerweitester Verbreitung und größter ökologischer Bedeutung. Sie äußern sich in Krümmungen, die zuvor ausgeführte tropistische Reaktionen wieder rückgängig machen, wenn der Reizanlaß nicht mehr wirksam ist. Ganz allgemein kann man die Beobachtung machen, daß eine tropistische Krümmung nicht erhalten bleibt nach Entfernung des Reizanlasses, vorausgesetzt daß das betreffende Organ noch reaktionsfähig ist. So gleichen sich geotropische Krümmungen am Klinostaten, phototropische Reaktionen im Dunkeln oder nach Beseitigung der anhomogenen Lichtverteilung wieder aus. Gleiches gilt für die haptotropischen Krümmungen der Ranken usw.

Die Anlässe zu diesen Ausgleichsbewegungen, die zur Folge haben, daß die gereizten Organe nach ihrer Beendigung gar nichts mehr von den zuvor ausgeführten Reizkrümmungen erkennen lassen, sind nicht in der anhomogenen Verteilung irgendwelcher Außenbedingungen zu suchen, sondern beruhen in der Reizkrümmung selbst. Vöchting schlug für diese rückregulierenden Ausgleichsreaktionen die Bezeichnung „Rektipetalität“ vor. Jedoch hat sich der von Pfeffer eingeführte Begriff Autotropismus allgemein eingebürgert. Nicht allein aber Reizkrümmungen werden durch autotrope Gegenkrümmungen, die ebenfalls aktive Reizreaktionen sind, ausgeglichen. Auch mechanische Krümmungen, die man Stengeln, Ranken usw. aufzwingt, werden, wie ich schon erwähnt habe, durch solche Reaktionen rückgängig gemacht. Ob bei diesen letzteren Ausgleichsreaktionen die gleichen inneren Bedingungskomplexe als auslösend maßgebend sind, wie bei denen, die auf tropistische Krümmungen zu folgen pflegen, ist zum mindesten zweifelhaft.

Was die Geschwindigkeit der autotropischen Ausgleichsbewegung betrifft, so ist sie meist aufs engste abhängig von der Geschwindigkeit des Reizvorganges. Je schneller der Reizvorgang abläuft, um so schneller pflegt auch die autotropische Rückkrümmung ausgeführt zu werden: Ranken gleichen Reizkrümmungen schnell aus, geotropisch gereizte Stengel sehr viel langsamer usw. Fast stets aber verteilt sich die Rückkrümmung über einen sehr viel größeren Zeitraum als die Reizkrümmung. Sie „braucht" ja auch nicht so schnell abzulaufen!

Man sieht also, wie die allerverschiedensten Faktoren Anlässe zu Krümmungsbewegungen bei festgewachsenen Pflanzen geben können, zu Bewegungen, deren Richtung durch die anhomogene Verteilung des Reizmittels bestimmt wird. Nicht unmöglich ist es, daß zu den bekannten durch weitere Forschungen noch neue Arten von Tropismen hinzukommen werden.

3. Die tropistischen Perzeptionsvorgänge. 3a) Allgemeines. Jede tropistische Reaktion beweist ohne weiteres, daß eine tropistisch erfolgreiche Perzeption eingetreten ist, und zeigt zugleich, daß die Pflanze die anhomogene Verteilung eines Außenfaktors, sei es nun von Licht, Schwerkraft, chemischen Stoffen usw., perzipiert hat. Zeigt also jede tropistische Reaktion das Vorhandensein einer Perzeption an, so läßt sich umgekehrt doch nicht aus dem Ausbleiben einer Reaktion der Mangel der tropistischen Perzeptionsfähigkeit eines Organes folgern: Manche Organe reagieren offenbar einfach deshalb nicht oder nicht mehr, weil sie nicht reagieren können, weil sie ausgewachsen sind. In diesem Falle wird man dann besonders allen Grund haben, auf das Fortbestehen der tropistischen Perzeptionsfähigkeit zu schließen, wenn für das noch wachstumsfähige Organ eine Reizperzeption hatte nachgewiesen werden können. Denn ob ein Organ ausgewachsen ist oder nicht, das hat mit seinem Perzeptionsvermögen direkt gar nichts zu tun, wie vor allem aus solchen Fällen einer fortgeleiteten Reaktion klar ersichtlich wird, wo die Perzeption in einem ausgewachsenen Organe sogar bevorzugt oder allein erfolgt (Graskeimblätter, Droseratentakeln).

Reagiert hingegen ein erwiesenermaßen reaktionsfähiges Organ auf eine direkte tropistische Reizung nicht, wohl aber nach Reizung einer davon entfernten Stelle, oder schwächer als nach Reizung solcher Stellen, so hat man allen Grund, auf den Mangel des tropistischen Perzeptionsvermögens in jenem Organe oder auf eine geringere Empfindlichkeit zu schließen. Diese Fälle einer verschiedenen Verteilung der tropistischen Sensibilitäten oder der Lokalisationen der Empfindlichkeiten sind begreiflicherweise von ganz besonderem Interesse, einmal, weil an sie eine weitere Analyse der Perzeptionsmechanik mit besonderer Aussicht auf Erfolg wird anknüpfen können, und zweitens, weil sie auf die Aehnlichkeit zwischen den Reizvorgängen bei Pflanze und Tier besonders deutlich hinweisen.

3b) Lokalisation der tropistischen Perzeption. Beim Tiere sind wir gewohnt zu sehen, daß die Reizperzeption oft weit entfernt von den Reaktionsorganen und noch dazu in besonderen Sinnesorganen erfolgt. Schon das Vorkommen von Reiztransmissionen bei Pflanzen wies darauf hin, daß auch bei dieser Organismengruppe die Reaktion oft durch Zuleitung von einer anderen, perzipierenden Stelle ausgelöst werden kann. Gleichwohl ist in der Mehrzahl dieser Fälle die Trennung von Perzeptionsorgan und Reaktionsorgan noch nicht völlig durchgeführt: fast stets nämlich ist auch die reagierende Zone, wenn auch vielfach weit schwächer als die Perzeptionszone, noch tropistisch sensibel, so die Streckungszone der Wurzel gegenüber der Wurzelspitze bei Rheotropismus, Traumatotropismus, Chemotropismus im weiteren Sinne des Wortes, die basalen Teile der Keimblätter mancher Gräser, wie z. B. Avena, bei Photo- und Geotropismus, und hat die Perzeptionszone selbst noch ein gewisses, wenn auch verhältnismäßig schwaches Reaktionsvermögen; das gilt für die gleichen, eben genannten Fälle sowie die Kotyledonen der Paniceen.

Eine völlige Trennung von sensorischer und motorischer Zone ist für Tropismen bisher nur in ganz wenigen Fällen nachgewiesen worden: so mit Sicherheit bei den Droseratentakeln, wo ausschließlich die Tentakelköpfchen hapto- und chemotropisch sensibel, die Tentakelstiele aber allein reaktionsfähig sind. Ist die Angabe Gassners richtig, daß für den Galvanotropismus nur die Wurzelspitze, aber nicht die Streckungszone empfindlich ist, so würde sich dieser Fall hier anschließen, wenn freilich auch die Wurzelspitze selbst noch ein gewisses Reaktionsvermögen besitzen dürfte.

Darf man nun aber in diesen Fällen einer strengen Lokalisation einer tropistischen Sensibilität oder in denen einer bevorzugten Empfindlichkeit gewisser Organteile gegenüber den reagierenden ohne weiteres behaupten, daß die Zellen in der Reaktionszone nicht mehr oder nicht mehr so vollkommen befähigt sind, den Reizanlaß zu perzipieren? Man muß darauf hinweisen, daß wir bei denjenigen tropistischen Reizprozessen, wo eine „Perzeptions-" und eine Reaktionszone getrennt sind, zunächst gar nichts weiter wissen, als daß zur Einleitung der

tropistischen Reaktion die Transmission eines tropistischen Impulses von der „Perzeptions"zone nach der Reaktionszone nötig und daß die Erregung der Zellen in der motorischen Zone, falls sie den Reiz doch perzipieren sollten, nicht imstande ist, die Reaktion zu veranlassen, d. h. tropistisch zu wirken.

Tatsächlich weist eine ganze Anzahl Tatsachen darauf hin, daß auch die Zellen der Reaktionszone, durch deren Reizung keine tropistische Reaktion ausgelöst wird, gleichwohl die nämlichen Reizanlässe zu perzipieren vermögen, die nach Reizung der Zellen der „Perzeptions"zone in dem Reaktionsorgan eine tropistische Krümmung veranlassen. So besitzen bei den einseits krümmungsfähigen Ranken, die man früher für einseits empfindlich hielt, gleichwohl auch die Zellen der bisher als unempfindlich geltenden Seiten eine nicht geringere Kontaktempfindlichkeit als die Unterseite, wenn auch die Reizperzeption auf diesen Seiten keine Kontaktkrümmung, sondern bloß die Hemmung der Ausführung einer von der Unterseite induzierten haptotropischen Reaktion zur Folge hat. Weiter darf auch für den Phototropismus der durch Lokalisation der Empfindlichkeit ausgezeichneten Paniceenkeimblätter die lokalisierte, in Phototropismus sich äußernde Lichtempfindlichkeit nicht als Anzeichen eines lokalisierten Lichtperzeptionsvermögens betrachtet werden. Auch außerhalb der allein oder vorzugsweise phototropischen Zone läßt sich eine hohe Lichtempfindlichkeit nachweisen, indem auch solche Teile das Licht perzipieren, die phototropisch nur nach Zuleitung eines tropistischen Reizes von anderer Seite her reagieren. Diese Lichtempfindlichkeit konnte man nachweisen durch die Wachstumshemmung, die die Belichtung des tropistisch nicht empfindlichen Hypokotyls zur Folge hat. Sehr interessant ist es, daß diese Wachstumshemmung auch durch Zuleitung nach ausschließlicher Belichtung des Keimblattes veranlaßt werden kann. Für diese Reaktion aber kann nach den vorliegenden Tatsachen die Empfindlichkeit der Koleoptile nicht größer als die des hypokotylen Gliedes angenommen werden. Ferner stellte man die sehr interessante Tatsache fest, daß ebenso wie kurze Belichtung der allein phototropisch empfindlichen Koleoptile von Paniceen so auch kurze ausschließliche Belichtung des phototropisch nicht reizbaren Hypokotyls schon genügt, um die phototropischen Reaktionszeiten der etiolierten Keimlinge gegenüber den nicht vorbelichteten zu verkürzen. Auch einige kürzlich mitgeteilte Beobachtungen von van der Wolk über den Einfluß der Belichtung auf die phototropische Empfindlichkeit bei Avena würden weiter verfolgt höchstwahrscheinlich ein ähnliches Ergebnis haben.

Die Versuche zeigen, daß auch in der Reaktionszone die Zellen eine Perzeptionsbefähigung für Kontakt- und Lichtreize besitzen.

Das Vermögen zu einer tropistischen Perzeption scheint nun aber manchmal im Laufe der Entwickelung abzunehmen oder ganz verloren zu gehen: darauf weisen z. B. die Verhältnisse in der Wurzel hin. Die Wurzelspitzenzellen, solange sie meristematisch sind und noch nicht begonnen haben, sich zu strecken, sind sehr traumatotropisch, chemotropisch, geotropisch. In der Zeit ihres hauptsächlichen Streckungswachstums dagegen haben sie diese hohe tropistische Perzeptionsbefähigung zum guten Teile verloren.

3c) Zahl der verschiedenen Perzeptionsarten. Eine sehr wichtige Vorfrage, die der Analyse der Perzeptionsmechanik vorausgehen muß, ist die, ob es ebensoviele tropistische Perzeptionsarten gibt wie Reizanlässe oder ob alle verschiedenen Reizanlässe einen und denselben tropistischen Perzeptionsakt auslösen. Die gleiche Frage muß übrigens auch für die verschiedenartigen, d. h. photo-, geo-, chemo- usw. tropischen Krümmungsreaktionen gestellt werden. Während nun nichts oder wenig direkt dafür spricht, daß die letzten Glieder der tropistischen Reizprozesse, d. h. also die Bewegungen qualitativ verschieden sind, ist das offenbar bei den Perzeptionsvorgängen ganz anders. Darauf weisen schon die Erfahrungen bei anderen Reizvorgängen, z. B. den Taxien, hin. Wissen wir doch, daß es dort sogar nicht bloß ein einheitliches chemotaktisches Perzeptionsvermögen gibt, sondern daß die Sensibilitäten gegen Salze und andere Verbindungen untereinander verschieden sind. So ist es offenbar auch bei den Tropismen. Viele Organe sind ja bloß für einzelne oder einige, aber längst nicht für alle Anlässe tropistisch empfindlich, z. B. die Ranken oft bloß für Kontaktreiz! Es ist auch schlechterdings nicht einzusehen, welche innere Verwandtschaft die ersten inneren Perzeptionsakte des Licht-, des Schwere-, des Kontaktreizes usw. haben könnten. Freilich bedarf die Frage nach der Verschiedenheit der Perzeptionsvorgänge auch bei den Tropismen sorgfältiger Untersuchung. Könnte es doch immerhin sein, daß wenigstens manche Reizanlässe trotz äußerer Verschiedenheit doch einen und denselben Perzeptionsvorgang auslösten. So wäre es zunächst denkbar, daß die galvanotropische und die traumatotropische Perzeption mit der chemotropischen identisch oder daß die rheotropische Perzeption zugleich die haptotropische wäre!

Untersucht ist die Frage vorläufig bloß für Schwerkraft und Licht. Wir wissen, daß Schwerkraftreize, die einzeln zu klein sind, um Reaktion auszulösen, summiert eine tropistische Krümmung bewirken. Pekelharing zeigte nun, daß eine solche Summation eines unterschwelligen Schwerkraftreizes und eines entsprechenden Lichtreizes unmöglich ist. Daraus folgt, daß die Perzeption des Schwerereizes von der des Lichtreizes verschieden ist. Darauf deuteten übrigens schon Unterschiede in der Länge der Reaktionszeiten und anderes hin.

3d) Mechanismus der tropistischen Perzeptionsvorgänge. Wie schon gesagt, genügt es zur Auslösung eines Tropismus noch nicht, daß ein Außenfaktor die Zellen der perzeptorisch tätigen Zone überhaupt in einen Reizzustand versetzt. Ein Tropismus wird bei einem physiologisch radiären Organe ja nur veranlaßt, wenn der Außenfaktor irgendwie anhomogen auf die Zellen der Perzeptionszone einwirkt: Gleichmäßige Beleuchtung aller Seiten, gleichmäßige Einwirkung der Schwerkraft auf ein radiäres Organ hat erfahrungsgemäß ebensowenig eine tropistische Krümmung zur Folge, wie Eintauchen von chemotropischen Organen in die wirksame Lösung. Dagegen tritt eine tropistische Reaktion ein, sobald die eine Seite etwas intensiver beleuchtet wird als die andere, oder die Schwerkraft etwas länger von der einen Seite gewirkt hat als von der anderen. Ja, selbst bei so physiologisch dorsiventralen Organen, wie den nicht allseits haptotropischen Ranken, zieht gleich starke Reizung der Unter- und der Oberseite keine tropistische Reizkrümmung nach sich!

Freilich ist die anhomogene Einwirkung der Außenreize für sich auf die Perzeptionszone noch keineswegs ausreichend, um eine tropistische Krümmung auszulösen, ebenso wichtig ist auch die Rückwirkung seitens der Reaktionszone: Obwohl die Oberseite der nicht allseits krümmungsfähigen Ranken kontaktempfindlich ist und obwohl der Kontaktreiz ganz genau so anhomogen wie auf der Unterseite einwirkt, so erfolgt eine tropistische Krümmung doch bloß nach Reizung der Unterseite. Die Eigenschaften der Zellen in der Reaktionszone sind es ja auch ganz allein, die über die Richtung der Reaktion, ob positiv oder negativ oder transversal usw. entscheiden.

Welcher Art nun muß die anhomogene Einwirkung seitens der Außenreize sein, um, falls die Reaktionsfähigkeit ausgebildet ist, eine bestimmt, d. h. in strenger Abhängigkeit von der anhomogenen Einwirkung des Reizes gerichtete Reizkrümmung auszulösen? Ueberblickt man die verschiedenen tropistischen Reizanlässe, so sieht man leicht, daß verschiedene Möglichkeiten in Betracht zu ziehen sind, die freilich nicht sämtlich für alle Reizanlässe Geltung haben können. Für den Photo-, Thermo-, Hapto-, Traumato-, Osmo- und Chemotropismus (inkl. Hydro- und Aerotropismus) liegt die Annahme am nächsten, daß die Krümmung ausgelöst werde irgendwie dadurch, daß der Unterschied zwischen den Reizzuständen auf der einen Flanke und auf der anderen Flanke wahrgenommen wird. Dann wäre der Vorgang im einfachsten Falle folgender: I. Die eine Seite wird durch den Außenreiz, z. B. den Kontaktreiz, gereizt; die Folge ist Perzeption; II. das Organ empfindet es, daß nur auf der gereizten, nicht aber auf der Gegenseite die Zellen in Reizzustand versetzt sind; III. Folge: irgendwie die tropistische bestimmt gerichtete Krümmung. Bleibt der Reizanlaß nicht streng auf die eine Seite beschränkt, so würden alle Seiten perzipieren; empfunden würde, daß an der Peripherie die Zellen sich nicht sämtlich in gleichem Reizzustande befänden; die Folge wäre irgendwie wieder die tropistische Krümmung.

Anders liegen die Verhältnisse vor allem beim Geotropismus: Hier wirkt der Außenfaktor gar nicht ausschließlich auf die peripher gelegenen Zellen der einen Seite. So kann also nicht der Unterschied im Reizzustande der Zellen auf opponierten Flanken des vielzelligen Organes Anlaß zur tropistischen Krümmung sein. Beruht die Geoperzeption auf einer Druckwirkung — und jedermann ist der Meinung, daß diese Ansicht richtig ist —, so macht sich diese Druckwirkung in allen sensiblen Zellen des Organquerschnittes in gleicher Weise und in gleicher Stärke geltend, ohne daß die Zellen auf der dem Erdzentrum zugewendeten Seite des horizontal gelegten Organes in einen anderen Reizzustand versetzt wären als auf der von der Erde abgewendeten Seite. Jedenfalls ist dies die bei weitem plausibelste Annahme. Anlaß zur gerichteten Krümmung ist also nicht der Unterschied im Reizzustande der Gewebe auf Ober- und Unterseite des Organs, sondern die Verlagerung der Druckrichtung in jeder Einzelzelle, die Schaffung des gleichen Reizzustandes in allen Zellen der Perzeptionszone. Ist überhaupt eine Unterschiedsempfindung zwischen zwei gleichzeitig nebeneinander bestehenden Reizzuständen der Anstoß zur Krümmung, so kann es beim Geotropismus höchstens der zwischen dem Zustande des Plasmas auf den jeweiligen Ober- und Unterseiten aller sensiblen Einzelzellen des Organes sein. Dementsprechend krümmen sich auch halbierte oder gevierteilte Stengel oder

Streifen, die man aus ihnen herausschneidet, noch geotropisch. Gleiches gilt bekanntlich für viele einzellige Organe, wo überhaupt bloß solche Unterschiede innerhalb einer Zelle in Betracht kommen können, falls sie für die tropistische Perzeption das Entscheidende sind. Durch welche Verkettung derartige Unterschiede die Bewegung nach sich ziehen können, das ist natürlich ebenso leicht oder ebenso schwer zu begreifen, wie wenn ein Unterschied der Reizzustände auf den verschiedenen Organseiten das auslösende Moment sein würde.

Ueber die Anlässe beim Auto- und Kamptotropismus wissen wir noch zu wenig, um diese Tropismen hier verwerten zu können.

Soll man nun annehmen, daß zwischen Geotropismus und anderen Tropismen in dieser Beziehung ein weiter Riß klafft? Oder gibt es ein Anzeichen dafür, daß wenigstens für manche ähnliches wie für den Geotropismus gilt? Da die verschiedenartigsten Tropismen auch bei einzelligen Organen vorkommen, so ist jedenfalls so viel sicher, daß schon Unterschiede im Reizzustande des Plasmas einer Einzelzelle zur Auslösung der Reaktion hinreichend sind.

3e) Besondere Einrichtungen zur Perzeption tropistischer Reize: Sinnesorgane. Die physiologische Pflanzenanatomie hat das große Verdienst, seit einer Reihe von Jahren auf die Möglichkeit des Vorkommens von anatomisch differenzierten Sinnesorganen zur Perzeption von Reizen, so auch zur Perzeption von tropistischen Reizen bei Pflanzen mit Nachdruck hingewiesen zu haben. Namentlich sind hier solche Bestrebungen von Haberlandt zu nennen. In der Tat: nachdem man erkannt hatte, daß bei Pflanzen ebenso wie bei Tieren die Perzeptionszone, das „physiologische" Perzeptionsorgan für einen Reizanlaß, räumlich oder gar morphologisch sich von der Reaktionszone unterscheiden kann und daß ein Reizleitungsvorgang beide Zonen verbindet, warum sollte es da nicht auch möglich sein, daß innerhalb der Perzeptionsorgane besondere histologische Differenzierungen, besondere Sinneszellen wie beim Tiere vorkommen?

α) Sinnesorgane zur Wahrnehmung des Kontaktreizes. Schon Pfeffer hatte bei Ranken mancher Gewächse in den Außenwänden der Epidermis eigentümliche Tüpfel beschrieben, von denen er sagt, daß sie voraussichtlich die Perzeption des Kontaktreizes erleichtern dürften (Fig. 5). Doch hebt der gleiche Forscher hervor, daß die Kontaktreizbarkeit nicht an solche Tüpfel gekettet sein kann. Denn die Ranken von Passiflora gracilis und coerulea, sowie von Cobaea und Vitis entbehren solcher Bildungen. Dabei sind die Ranken von Passiflora besonders kontaktempfindlich, jedenfalls viel empfindlicher als die von Cucumis, obwohl diese solche Tüpfel

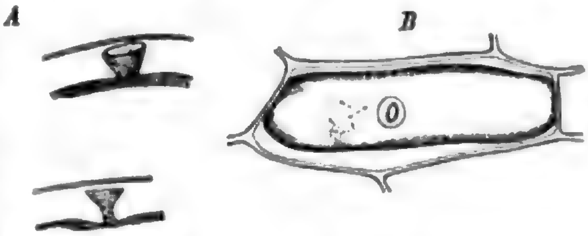


Fig. 5. A Fühltüpfel in den Epidermisaußenwänden der Ranken von Cucurbita Melopepo; B Oberflächenansicht einer Epidermiszelle der Ranke von Cucurbita Pepo; in der Mitte der Fühltüpfel. Alkoholmaterial.

besitzen. Außerdem fehlen die Tüpfel auf den Oberseiten vieler nicht allseits krümmungsfähiger Ranken, z. B. von Cucumis, Cucurbita Pepo und Cyclanthera explodens, obwohl auch diese Seiten sehr kontaktempfindlich sind. Haberlandt hat später diese Bildungen als Fühltüpfel genauer beschrieben und die sonstigen strukturellen Eigentümlichkeiten der peripheren Rankenzellen in der Perzeptionszone ermittelt. Wenn er aber diese Zellen als die Sinneszellen bezeichnet, so ist er den Beweis dafür schuldig geblieben, daß nur diese peripheren Zellen den Kontaktreiz zu perzipieren vermögen und ebenso, daß die Baueigentümlichkeiten, die er in Beziehung zur Reizperzeption setzt, tatsächlich dieser Funktion dienen.

β) Sinnesorgane zur Perzeption des Schwerereizes. Viel Aufsehen haben dann ferner namentlich die Bestrebungen von Němec und Haberlandt gemacht, besondere histologisch ausgezeichnete Sinnesorgane zur Perzeption des Schwerereizes nachzuweisen. Schon ehe diese Forscher ihre sogenannte Statolithentheorie (oder Otolithentheorie) aussprachen, hatte man aber über die Perzeptionsmöglichkeiten bemerkenswerte Ideen ausgesprochen. Noll hatte zunächst darauf hingewiesen, daß nur die Hautschichte des Plasmas jeder Zelle für die geotropische Reizperzeption in Betracht kommen könne; denn nur sie habe bei den Strömungsbewegungen, die die übrigen Plasmateile oft durcheinanderwirbeln, Stabilität. Bewiesen ist die Bedeutung der Plasmahaut als „Sinnesschicht" bisher aber nicht. Noll hat dann weiter Ueberlegungen darüber angestellt, wie in der Hautschicht der Schwerereiz perzipiert werden könne. Er kam zu der Vorstellung, daß in der Hautschicht jeder Zelle nach dem Prinzipe der tierischen Statocysten gebaute, aber „ultramikroskopische" Sinnesorgane („Reizfelder") vorhanden sein müßten von Hohlkugelform, mit Saft und einem kleinen spezifisch schwereren Körper-

chen erfüllt. Perzipiert werde die Druckrichtung dieses Statolithen auf die sensible Kugelschale. Noll dachte sich ferner enge Beziehungen zwischen dem Orte der Reizung dieser Statocysten und der Beeinflussung des Wachstums der betreffenden Zellen, durch die die Krümmung ausgelöst werde: Drückt der Statolith auf die Außenseite der Kugel, so ist Wachstumsbeschleunigung, drückt er auf die Innenseite, so ist Wachstumshemmung bei negativ geotropischen Organen die Folge. Diese Auffassung steht aber weder im Einklange mit der Wachstumsverteilung in den geotropisch reagierenden Organen, noch mit dem Verhalten von Sproßlamellen. Zudem läßt sich die Hypothese kaum durchführen, wenn die Perzeptionszone von der Reaktionszone getrennt ist. Uebrigens lassen sich ähnliche Reizfelder bei anderen Tropismen gar nicht einführen, um damit die Krümmungsrichtung zu erklären. Man konnte ja für den Phototropismus zeigen, daß nicht die Annahme polar gebauter Sinnesorgane, sondern nur die Annahme der Induktion eines polaren Gegensatzes in der zunächst apolar gebauten Perzeptionszone alle Beobachtungen bei Avenakeimblättern begreiflich macht.

In anderer Richtung haben nun Haberlandt und Němec die Statocystenvorstellung Nolls weitergebildet. Sie ließen das Problem nach der Beziehung solcher hypothetischer Sinnesorgane zu der Reizreaktion beiseite und legten den Hauptnachdruck auf die Frage, ob nicht der Schwereperzeption besondere, womöglich besonders funktionstüchtige, für den „Zweck" der Perzeption extra ausgebildete spezifisch schwerere Körperchen von mikroskopischer Sichtbarkeit dienen könnten oder müßten. Es gelang ihnen zu zeigen, daß die Stärkescheide der Stengel aus Zellen besteht, die große, leicht bewegliche Stärkekörnchen enthalten (Fig. 6) und daß diese Körnchen, dem Zuge der Schwere folgend, schon nach kurzer Zeit (Wanderzeit der Stärkekörner) sich stets im unteren Teile der Zellen sammeln. Diese ganzen Zellen sprachen sie nun als Statocysten an, die leicht beweglichen Stärkekörnchen als Statolithen. Damit schienen die eigentlichen Perzeptionsorgane für den Schwerereiz gefunden. Statocysten ganz entsprechenden Baues entdeckten sie in der Wurzel: hier liegen sie beachtenswerter Weise in dem zentralen Teile der Wurzelhaube, die das Meristem des Vegetationspunktes kappenartig überzieht.

Zunächst dachten sich diese Forscher, daß Vorbedingung der Geoperzeption eben die so besonders auffällige, in anderen Zellen fehlende Ansammlung der Stärkekörnchen auf der einen Seite der Zellen sei. Gerade die leichte Beweglichkeit schien ihnen eine sehr zweckmäßige Anpassung von großer funktioneller Bedeutung für den Perzeptionsvorgang zu sein. Nachdem sich aber sowohl durch Rotationsversuche wie durch Versuche mit intermittierender Reizung gezeigt hatte, daß die Ansammlung nicht die Bedingung für die Reizperzeption sei, änderten sie ihre Ansicht dahin, daß für die Perzeption schon der einseitige Druck der Stärkekörnchen genüge. Es fanden sich denn auch Objekte, die geotropisch reagieren, obwohl sie keine leicht bewegliche Stärke in irgendwelchen Zellen enthalten. Außerdem wurde darauf hingewiesen, daß der Nachdruck nicht auf das Vorhandensein gerade von Stärkekörn-

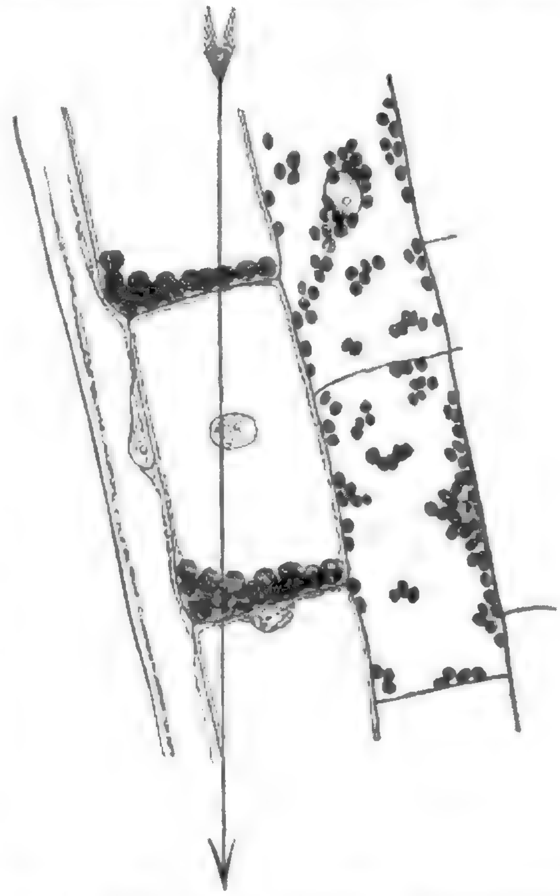


Fig. 6. Teil eines radialen Längsschnittes durch einen schief gestellten Stengelknoten von Tradescantia virginica. Der Pfeil gibt die Schwerkraftrichtung an. Die dunklen Körner sind die Stärkekörner. Nach Haberlandt.

chen, sondern überhaupt von verhältnismäßig groben spezifisch schweren Körperchen, wie z. B. auch von Kristallen, zu legen sei, und als schließlich auch Objekte gefunden wurden, die ganz ohne solche Körper gleichwohl geotropisch reagieren, daß die Stelle der groben Körner zum mindesten bei manchen Pflanzen auch durch sehr kleine, nur wenig spezifisch schwerere, sich nicht einseitig ansammelnde Körnchen

oder gar durch spezifisch leichtere Körperchen vertreten werden könne, mit anderen Worten, daß für die Geoperzeption eben eine Massenwirkung das Ausschlaggebende sei, eine Ansicht, die, wie wir sahen, durch Knights Zentrifugalversuche längst herrschend geworden war. Dort aber, wo große Stärkekörner (oder eventuell große Kristalle) vorhanden seien, seien sie jedenfalls als die eigentlichen oder hauptsächlichen Statolithen anzusehen und die sie bergenden Zellen als die besonders zweckmäßig ausgebildeten Perzeptionsorgane, als die eigentlichen Sinnesorgane, zu betrachten.

Es würde hier zu weit führen, auf die sehr interessanten anatomischen Differenzen einzugehen, die verbunden mit Verschiedenheiten im geotropischen Reaktionsvermögen bei zahlreichen Organen nachgewiesen wurden; dafür vergleiche man die Zusammenfassung bei Haberlandt (1909) und die Fülle der dort zitierten Arbeiten, die darüber bereits erschienen sind. Nur die prinzipielle Frage kann uns hier interessieren: Da doch nun einmal bekannt ist, daß auch Zellen ohne ausgesprochene Statolithen schnell und intensiv durch die Schwerkraft gereizt werden (z. B. Coprinus), läßt sich da exakt nachweisen, daß andere, namentlich die höheren Pflanzen, besondere, durch grobe Statolithen ausgezeichnete Perzeptionsorgane bedürfen, um den Schwerereiz zu perzipieren? Für den Stengel ist ein solcher Nachweis bisher jedenfalls nicht gelungen: die operative Entfernung der Stärkescheidenstatocysten ist mit solch tiefgreifenden Verletzungen und Gewebezerstörungen verbunden, daß die Stengel allzu schwer geschädigt werden. Beseitigung der Stärke-Statolithen durch Aushungern usw. ist, wie übrigens auch bei der Wurzel, entweder nicht oder doch nur ebenfalls mit schwerer Schädigung des ganzen Organes möglich. Bei der Wurzel, wo die Statolithenzellen von der Reaktionszone gesondert sind, scheint der Nachweis leichter. So hat sich zunächst Haberlandt bemüht, mittelst des Piccardschen Versuches zu zeigen, daß die Haube tatsächlich der Sitz der maximalen geotropischen Empfindlichkeit sei. Jost hat indessen darauf hingewiesen, daß diese Deutung willkürlich ist. Der Ausfall der Zentrifugalversuche läßt auch die Deutung zu, daß die maximale geotropische Sensibilität im Transversalmeristem und außerdem eine geringere in der ganzen Wachstumszone sich befindet. Entfernung der Haube durch Dekapitation gibt keine eindeutigen Resultate. Wäre die Statolithenhypothese richtig, so sollte man meinen, daß alle Verwundungen, die die Haube treffen, den Geotropismus viel stärker beeinflussen müßten, als andere. Aber gerade das Gegenteil stellte Jost fest: Alle Teile der Spitze sind gleich empfindlich gegen Verwundung und jedes Stück kann entbehrt werden, wenn es nur nicht zu groß ist. So müssen sich die Verteidiger der Statolithenhypothese damit begnügen, darauf hinzuweisen, daß wir keine andere Bedeutung für die seltsamen Stärkescheiden- und Wurzelhaubenzellen kennen (bei wieviel organischen Gebilden ist das aber nicht der Fall!) und daß auffälligerweise die Stärke sich aus diesen sonst inhaltsarmen schwerer als aus anderen Zellen entfernen läßt, was aber doch zunächst bloß darauf hinweist, daß die stärkelösenden Enzyme in diesen Zellen nur spärlich vertreten sind, und sie müssen sich darauf beschränken, Indizienbeweise für die Richtigkeit ihrer Hypothese beizubringen. Das sind im wesentlichen Schüttelversuche. Wenn, argumentiert Haberlandt, es wirklich der Druck der leicht beweglichen, in die Plasmahäute der Statocysten eindringenden Stärkekörner ist, der als Reiz perzipiert wird, so muß die Reizintensität zunehmen, wenn man die Deformation des Plasmas durch rasch wiederholte Vertikalstöße von unten her beschleunigt. In Versuchen, bei denen die Stoßhöhe meist nur Bruchteile eines Millimeters, die Anzahl der Stöße 5 bis 15 in der Sekunde betrug, will dieser Forscher tatsächlich die vermutete Steigerung der Erregung beobachtet haben (vgl. auch Fr. Darwin). Bach fand indeß bei einer Nachprüfung dieses Ergebnis nicht bestätigt. Seine negativen Resultate wirken auch nach einer Entgegnung Haberlandts noch durchaus überzeugend.

Das ist im wesentlichen das physiologische Material, das die Verfechter der Statolithenhypothese für sich beizubringen vermögen. Unser Urteil muß deshalb vorläufig lauten: Eine gewiß sehr geistreiche Hypothese, vor allem interessant als Versuch, den Zellen mit leicht beweglicher Stärke eine bestimmte Bedeutung unterzuschieben, auch sehr anregend in physiologischer Richtung, aber kaum imstande, die Geoperzeption physiologisch verständlicher zu machen als bisher!

γ) Sinnesorgane zur Wahrnehmung des Lichtreizes. Auf einem dritten Gebiete der Tropismen endlich hat die physiologische Anatomie dann noch eingegriffen mit einer Hypothese, die nicht weniger Aufsehen als die Statolithenhypothese machte und keine geringere Bewegung als diese in der Literatur hervorrief: Auch die Lichtsinnesorgane, wenigstens der Laubblätter, will Haberlandt aufgefunden haben. Die Laubblätter vieler Pflanzen sind transversal phototropisch. Das Reaktionsorgan ist meist der Blattstiel, dagegen kann der Reiz wenigstens bei vielen Blättern in der Spreite bereits per-

zipiert werden. Es ist gewiß ein recht schwieriges Problem, wie durch einseitige oder ungleiche Belichtung einer Blattspreite der Blattstiel zu einer in ihrer Richtung von der Lichtquelle abhängigen Reizkrümmung veranlaßt werden kann, sehr viel schwieriger noch als das gleiche Problem beim zylindrischen Keimblatt von Avena. Wir wissen darüber tatsächlich noch gar nichts.

Dieses physiologisch eigentlich wichtige Problem hat freilich Haberlandt gar nicht berührt. Ihn als Anatomen beschäftigte hauptsächlich die Frage, ob nicht gewisse Baueigentümlichkeiten der Epidermis auf der Blattoberseite als Einrichtungen zur Perzeption des Lichtreizes gedeutet werden könnten. Tatsächlich ist er dieser Meinung. Bezüglich der anatomischen Details kann wieder auf Haberlandts physiologische Anatomie (1909) verwiesen werden. Folgende Bautypen werden unterschieden: 1. Die papillöse Epidermis. Haberlandt bezeichnet sie als häufigsten und zugleich vollkommensten Typus des Lichtsinnesorgans. Er ist gekennzeichnet durch die Vorwölbung der Epidermisaußenwände, während die Innenwände annähernd eben und parallel zur Blattoberfläche gerichtet sind. Fällt auf eine solche Epidermiszelle senkrecht zur Blattfläche ein Lichtstrahlenbündel, so werden die Lichtstrahlen durch die „Linsenfunktion" der Zelle so gebrochen, daß die konvergierenden Lichtstrahlen die Mitte der Innenwand am stärksten beleuchten, während eine mehr oder weniger breite Randzone überhaupt nicht direkt beleuchtet wird. Fällt jetzt das Licht nicht senkrecht, sondern schräg zur Blattfläche ein, so verschiebt sich diese zentrische Intensitätsverteilung des Lichtes exzentrisch sowohl auf der Außenals auch auf der Innenwand jeder Zelle. Haberlandt stellt sich nun die plasmatischen Innenwände der Epidermiszellen als lichtempfindlich vor: empfunden werde einmal der Unterschied zwischen hell und dunkel und dann der Unterschied zwischen zentrischer und exzentrischer Beleuchtung. Bei zentrischer Beleuchtung herrsche phototropisches Gleichgewicht; die exzentrische Beleuchtung löse aber im Stiele eine solche Reizbewegung aus, daß die zentrische Intensitätsverteilung auf den Innenwänden wiederhergestellt werde. 2. Die glatte Epidermis: Die Außenwände sind eben, die Innenwände dagegen nach dem Assimilationsgewebe vorgewölbt (Monstera deliciosa, Hedera helix). 3. Lokale Lichtsinnesorgane oder Ozellen: Einzelzellen oder Zellgruppen von Linsenbau, die zwischen die anderen Epidermiszellen eingestreut sind (Fig. 7).

Auch hier können nur Experimente die Entscheidung bringen. Als vorläufig entscheidend sind Versuche Nordhausens anzusehen, wonach die Lichtperzeption bei Blättern von Begonia auch nach vorsichtiger Entfernung der von Haberlandt als Lichtsinnesorgan angesprochenen Epidermis noch erfolgt! Auch nach Ausschaltung der „Linsenfunktion", wie sie durch Benetzung der Epidermis mit bestimmten Flüssigkeiten möglich ist, erhielt Nordhausen (siehe auch Kniep) in überzeugend wirkenden Versuchen im Gegensatz zu Haberlandt noch phototropische Krümmungen. Sonach muß man schließen: die Baueigentümlichkeiten der Epidermis der Laubblätter sind zur Perzeption des phototropischen Reizes unnötig. Ja, es ist sogar zweifelhaft, ob die linsenförmig gebauten Epidermiszellen durch ihren histologischen

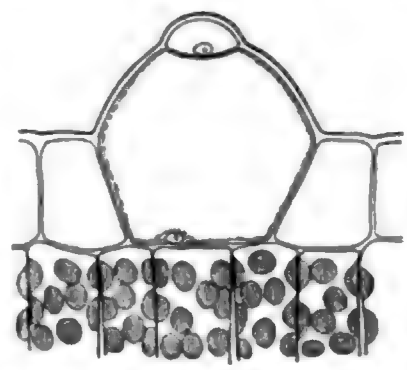


Fig. 7. Linsenförmige Zelle der Blattoberseite von Fittonia Verschaffeltii quer. Nach Haberlandt.

Bau die Perzeption begünstigen. Für die Physiologie hat diese Hypothese, soweit prinzipielle Fragen in Betracht kommen, bisher wenig geleistet. Sie ist wie die Statolithenhypothese im wesentlichen als ein sehr geistreicher Versuch anzusehen, Struktureigentümlichkeiten gewisser Zellen unbekannter Funktion eine bestimmte Bedeutung zuzuschreiben.

4. Die tropistischen Reiztransmissionen. 4 a) Allgemeines. Die Vielförmigkeit der tropistischen Reizreaktionen (bald positiv, bald negativ, transversal oder in Torsionen bestehend) in ein- oder mehrzelligen Organen und die, jeder Regel spottende Mannigfaltigkeit ihrer Mechanik läßt schon erkennen, daß die tropistischen Krümmungsbewegungen nicht grob mechanisch direkt durch die anhomogene Verteilung der Außenfaktoren bewirkt sein können, wie man sich früher gerne vorstellte. So dachte man sich z. B. die phototropische Krümmung dadurch hervorgerufen, daß, wie im Dunkeln das Wachstum energischer ist als im Licht, so auf der belichteten Seite das Wachstum gehemmt, auf der Gegenseite dagegen beschleunigt werde. Dagegen sprach aber schon die Tatsache, daß es neben positivem Phototropismus auch nega-

tiven und transversalen gibt und daß ein und dasselbe Organ bald positiv, bald negativ reagieren kann. Daß die Beziehungen zwischen den Reizanlässen und den tropistischen Reaktionen nicht so einfach sein können, darauf wiesen dann auch die Reiztransmissionen hin, die von Jahr zu Jahr in größerer Menge aufgefunden wurden.

Vielfach kann nämlich eine tropistische Reizkrümmung dadurch ausgelöst werden, daß der Reizanlaß nicht auf die Reaktionszone, sondern auf eine Organpartie mehr oder weniger weit von ihr entfernt einwirkt. Hier ist die Einschaltung eines Reizleitungsvorganges zwischen Perzeptionsort und der Stelle der Reizreaktion offensichtlich. Die ersten und interessantesten Fälle solcher tropistischen Reizverkettungen und damit eine wichtige Uebereinstimmung zwischen den Reizprozessen bei Pflanzen und Tieren nachgewiesen zu haben, ist eines der großen Verdienste Ch. Darwins. Diese Fälle, um deren einige später lange heißer Kampf entbrannte, öffneten einer neuen, angemessENEREN Auffassung der Tropismen bei Pflanzen die Tür.

4b) Verbreitung. α) Phototropismus. Eine phototropische Reizleitung stellte Darwin bei einer Anzahl Keimlingen fest. Obwohl seine Angaben von Wiesner heftig bestritten wurden, haben sie sich durch neue und sehr exakte Versuche Rotherts im wesentlichen als richtig erwiesen. Ja Rothert gelang es zu zeigen, daß nicht nur in Keimlingen von Monokotylen und Dikotylen, sondern auch in den Sämlingsblättern der Zwiebel (Allium Cepa), in verschiedenen Blattstielen (z. B. von Tropaeolum) und in sehr zahlreichen Stengelorganen entwickelter Pflanzen der phototropische Reiz geleitet wird. Bei Begonia wird der Reiz von der Blattspreite nicht nur in den Blattstiel, sondern auch bis in den Stengel hinein transmittiert. Seitdem sind noch viele neue Fälle hinzugekommen. Meist ist sowohl die vom Reizanlaß getroffene Organstelle, als auch die im Versuche verdunkelte, in die der phototropische Reiz geleitet wird, direkt phototropisch empfindlich, während die phototropische Krümmungsfähigkeit dem Organe, das den Reiz aufnimmt, fehlen kann, wie z. B. der Blattspreite.

Besonders interessant sind demgegenüber die Keimlinge einiger Gräser aus der Gruppe der Paniceen (Panicum miliaceum, P. sanguineum, Setaria viridis). Bei ihnen ist nur der Kotyledo phototropisch empfindlich, das hypokotyle Glied dagegen nicht sensibel: es krümmt sich nur unter dem Einflusse eines vom Kotyledo zugeleiteten Reizes. In anderen Fällen ist wenigstens die phototropische Empfindlichkeit ungleichmäßig verteilt: z. B. bei dem zylindrischen Kotyledo des Hafers (Avena), dessen Spitze zuerst aus dem Boden hervorbricht, ist besonders empfindlich eine kurze nur 3 mm lange Spitzenregion, während der übrige Teil weniger, und zwar von der Spitze aus abnehmend phototropisch empfindlich ist. Diese Tatsache läßt sich in folgender Weise leicht nachweisen: Wird der besonders empfindliche Spitzenteil einseitig beleuchtet, der weniger empfindliche Basalteil aber ebenso stark oder noch etwas stärker einseitig von der Gegenseite, so krümmt sich die Basis zwar zunächst im Sinne des direkten Lichteinfalles, einige Stunden nach Versuchsbeginn aber in genau entgegengesetzter Richtung im Sinne der Reizung der Spitze (Fig. 8).

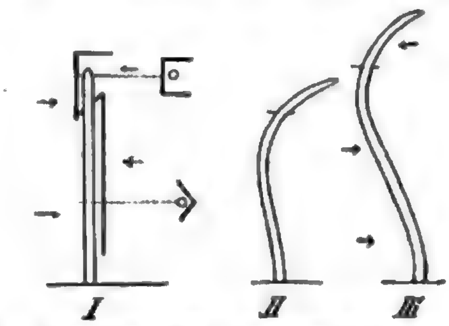


Fig. 8. Avenakeimling, bei dem Spitze und Basis des Keimblattes mit gleicher Intensität, aber von entgegengesetzter Seite (im Sinne der Pfeilrichtungen) beleuchtet wurde. Das von der einen Seite einfallende Licht wurde von der Spitze bezw. Basis durch eine an dem Keimblatte befestigte schwarze Papierschürze abgeblendet, deren Form aus dem Grundriß (rechts) und Aufriß (links) in Abbildung I ersichtlich ist. I bei Versuchsbeginn. II und III Ergebnis des Versuches nach 5 Stunden. Der horizontale Strich markiert die Grenzen der beiden Lichtrichtungen. Nach Rothert 1894.

Die Paniceenkeimlinge sind deshalb besonders interessant, weil hier einer der im Pflanzenreiche seltenen Fälle der Trennung von Aktionszone und Perzeptionszone vorliegt. Freilich ist hier die Trennung noch nicht einmal völlig durchgeführt; denn die Kotyledonen sind selbst, wenn auch schwach, phototropisch krümmungsfähig.

Um phototropische Reiztransmissionen bei Keimlingen nachzuweisen, bedient man sich nach Rotherts Vorgange am besten kleiner Kästchen aus schwarzem Papier, die mit einem entsprechenden Deckel sich verschließen lassen. Sie dienen zur Abhaltung des Lichtes. Die Keimlingsspitzen läßt man durch ein Loch im Deckel ans Licht treten. Zur Verdunkelung der basalen Teile ist auch sehr geeignet fein gesiebte trockene Gartenerde, zur Verdunkelung der Spitzenteile Stanniol, aus dem man sich über einem Nagel oder Holzstäbchen Käppchen anfertigt. Bei Blättern sind oft kompliziertere Versuchsanordnungen nötig.

β) Geotropismus. Auch bei der Wurzel

glaubte Ch. Darwin zeigen zu können, daß die geotropische Krümmung in der Wachstumszone, ähnlich wie der phototropische Reiz bei den Paniceenkeimlingen, nur durch Zuleitung von der allein empfindlichen und selbst schwach geotropisch krümmungsfähigen Wurzelspitze ausgelöst werden kann. Er zog diesen Schluß aus der Beobachtung, daß Wurzeln, denen er die Spitzen abgeschnitten hatte, nicht mehr geotropisch reagierten, während sie sich krümmten, wenn die Dekapitation erst nach der Reizung vorgenommen wurde. Diese Angabe hat lange Zeit zahlreiche Physiologen beschäftigt, ohne indes eine Klärung der Ansichten zugunsten Darwins Auffassung zu bringen. Rothert hat alle diese Arbeiten 1894 in einer kritischen Studie besprochen, auf die hier verwiesen sei.

Eine brauchbare Methode hat erst Piccard ersonnen. Sie beruht auf demselben Prinzip, das Rothert bereits vorher beim Hafer (vgl. oben) zur Ermittelung der phototropischen Sensibilitätsgröße der Keimblattzonen verwendet hatte: Reizung der Wurzelspitze und der Wachstumszonen von entgegengesetzten Seiten. Das war freilich nicht mittels der Schwerkraft möglich, wohl aber unter Verwendung der Zentrifugalkraft auf einem Rotationsapparate. Man braucht ja nur die Wurzel so schräg an dem Zentrifugalapparate zu befestigen, daß die ideelle Verlängerung der Drehachse die Wurzel etwas hinter der Spitze schneidet. Dann wird in der Spitze die Massenbeschleunigung in entgegengesetztem Sinne zur Geltung kommen wie in der Streckungszone.

Mit dieser Methode haben Piccard, Haberlandt und Jost an Wurzeln gearbeitet. Die beiden letzten Autoren sind im wesentlichen zu gleichen Ergebnissen gelangt: Stets traten einheitliche Krümmungen ein, die im Sinne der Spitzenreizung ausfielen, wenn die Spitze etwa 1,5 bis 2 mm lang war, dagegen im Sinne der Wachstumszone, wenn die Spitze nur 1 mm oder weniger lang war. Aus diesen Beobachtungen geht jedenfalls so viel klar hervor: geotropisch empfindlich ist sowohl die Spitze als auch zum mindesten ein Teil der Streckungszone und von der Spitze ist eine Reiztransmission in die Wachstumszone erkennbar. Haberlandt glaubt aber noch weiter schließen zu können, daß in der Wurzelspitze und zwar in der Wurzelhaube der Sitz der größten geotropischen Empfindlichkeit sei und daß von hier aus die Empfindlichkeit über das Meristem und die Wachstumszone allmählich abnehme. Jost zeigte indes, daß diese Deutung willkürlich ist. Die erwähnten Beobachtungen lassen z. B. ebenso gut die Annahme zu, daß in der Spitze das Meristem und die unmittelbar daran stoßenden Teile der Haube einerseits, der Wachstumszone andererseits der Sitz der maximalen geotropischen Sensibilität sind, daß aber eine schwächere Perzeption auch sonst möglich ist.

Eine Entscheidung zugunsten der Auffassung von Haberlandt lassen auch nicht die zahllosen Dekapitations- und Verwundungsversuche zu, die nach Darwin so viele Forscher, zuletzt Jost, mit Wurzeln angestellt haben. Nur Josts Beobachtungen seien als typisch hier in Kürze angeführt. Sie beziehen sich sämtlich auf Lupinus albus. 1. Dekapitation von ½ bis ¾ mm ruft kurzen Wundshock hervor; nach einigen Stunden tritt die geotropische Reaktion ebenso schnell ein wie bei einer intakten Wurzel. 2. Etwas weiter gehende Dekapitation brachte den Verlust des Geotropismus für mehrere Tage. 3. Sticht man kleine zylindrische Gewebepartien aus der Spitze, sei es aus der Haube, dem Meristem oder dem Gewebe hinter dem Meristeme heraus, ohne sonst etwas von der Spitze abzuschneiden, so kehrt nach einem Wundshocke der Geotropismus zurück. 4. Gleiches gilt für Längseinschnitte durch die Haube. 5. Zwei Quereinschnitte hinter der Spitze bis zur Plerommitte wirken bei weitem nicht so deletär auf den Geotropismus wie die völlige Dekapitation hinter dem Meristeme trotz gleicher Größe der Wundflächen. 6. Gleiches gilt für einen Quereinschnitt: nach dem Wundshocke kehrt die Reaktionsbefähigung zurück. Stets also hebt Spitzendekapitation die geotropische Reaktion viel länger auf als alle anderen Einschnitte. Für die Reaktionsbefähigung der Wurzel ist es demnach von größter Wichtigkeit, daß die Spitze vorhanden ist. Die gleiche Beobachtung hatte früher schon Rothert an den Keimblättern der Gräser bei phototropischer Reizung gemacht: Nur dann wurde die phototropische Empfindlichkeit im unteren Teile solcher Keimblätter (z. B. von Avena) vorübergehend durch Wundreiz aufgehoben, wenn die Spitze des Keimblattes durch einen Querschnitt abgetragen worden war, nicht aber durch andere, noch viel schwerere Verwundungen. Diese Tatsachen weisen auf eigenartige korrelative Beziehungen zwischen Spitze und Basis von Organen hin, Beziehungen, die zunächst nichts direktes mit dem tropistischen Reizvorgange zu tun haben. Diese Bedeutung der Spitze kann man als tonische bezeichnen. Wird die Spitze entfernt, so fällt ihre tonische Funktion weg, bis durch Regeneration eine neue Spitze regeneriert ist. So haben also Darwins Dekapitationsversuche eine plausible Erklärung gefunden.

Außer für die Wurzel ist eine geotropische Reizleitung zugleich verbunden mit ungleicher Verteilung der Sensibilität auch

nachgewiesen worden für einige der Graskeimlinge, bei denen Rothert ähnliches für den Phototropismus erwiesen hatte, auch mit Piccards Methode. Bei Avena ist zwar das ganze Keimblatt geotropisch, aber die Spitze ganz besonders sensibel; wie es scheint, entsprechend dem Phototropismus in einer Länge von etwa 3 mm. Aehnliches gilt für Hordeum und Phalaris. Dagegen scheint es mir noch nicht genügend durch v. Guttenbergs Versuche erwiesen, daß bei den untersuchten Paniceen allein das Keimblatt und nicht das hypokotyle Glied geotropisch empfindlich ist, wie dieser Autor meint, wenn auch eine geotropische Reizleitung von der Koleoptile zu dem Hypokotyle mit Versuchen nach Piccards Methode festgestellt ist. Beachtenswert ist es, daß bereits Rothert längst vor solchen Rotationsversuchen aus dem Ablaufe der geotropischen Krümmung bei dem Keimblatt von Avena auf eine besonders große Spitzenempfindlichkeit geschlossen hat: Obwohl nämlich die Spitze geringere Krümmungsfähigkeit besitzt als andere Teile des Keimblattes, so krümmt sie sich doch früher geotropisch als diese, wenn man den Keimling horizontal legt. Ein Schluß auf eine Reiztransmission war aus diesem Verhalten natürlich noch nicht möglich.

γ) Haptotropismus. Auch eine haptotropische Reizleitung läßt sich leicht nachweisen. Sie ist sogar, wenigstens bei den kontaktempfindlichen Ranken, deshalb besonders interessant, weil sie für die Auslösung der Reizkrümmung überhaupt nötig ist und zwar auch dann, wenn die Krümmung an der berührten Stelle selbst erfolgt. Bei den Ranken nämlich kommt die Reizreaktion zustande durch Wachstumsbeschleunigung der berührten Stelle, vor allem natürlich durch plötzliche Verlängerung der konvex werdenden, also der Berührungsstelle gegenüber liegenden Seite. Und diese Reizleitung muß sogar sehr schnell erfolgen. Dieser Fall ist geeignet, darauf hinzuweisen, daß auch sonst bei vielen Tropismen, wo die Krümmung sich auf die gereizte Zone beschränkt, offenbar Reizleitungen am Zustandekommen der gerichteten Krümmung beteiligt sein können oder müssen, wenn sich diese aus der Mechanik der Bewegung oder auf andere Weise auch noch nicht direkt nachweisen lassen. Bei den nicht allseits haptotropischen Ranken muß aber nicht bloß eine Reizleitung von der Unterseite nach der Oberseite, sondern umgekehrt auch von der kontaktempfindlichen, aber nicht haptotropisch empfindlichen Oberseite nach der Unterseite durch den Kontaktreiz ausgelöst werden: Ohne eine solche Transmission bliebe die völlige Unterdrückung der durch Reizung der Unterseite angestrebten Krümmung nach gleichzeitiger Reizung der Oberseite ganz unverständlich.

Eine haptotropische Reizleitung besteht in Ranken aber außer in querer Richtung auch in Längsrichtung der Ranken von der berührten Stelle aus: Die Krümmung bleibt nämlich niemals ganz genau auf die berührte Stelle beschränkt, sondern breitet sich beiderseits der Reizstelle um einige Millimeter bis zu 1 cm aus. Außer dieser so beschränkten, in wenigen Minuten ablaufenden Reizleitung gibt es ferner auch noch eine sehr viel weiter fortschreitende, die sich bedeutend später geltend macht: Hat nämlich eine Ranke mit ihrer Spitze sich um eine Stütze gewickelt, so rollt sich nach einigen Stunden oder Tagen der ganze basale, oft 10 bis 20 cm lange Teil der Ranke von der Stütze aus schraubenförmig zusammen, obwohl er nicht mit der Stütze in Berührung gekommen ist. Diese Reaktion, die in sehr zweckmäßiger Weise den Sproß näher an die ergriffene Stütze heranzieht, wird, sicher wenigstens bei manchen Ranken, durch eine Reiztransmission ausgelöst, die von der Stütze ausgeht, die aber vielleicht nicht mit der des Kontaktreizes identisch ist.

Auch bei den Sporangienträgern von Pilzen ist eine haptotropische Reizleitung beobachtet worden. Bei Phycomyces krümmt sich der Sporangienträger in seinem obersten, allein noch wachstumsfähigen Teile, einige Millimeter unterhalb der Ansatzstelle des Sporangiums auch dann haptotropisch, wenn nur ein kleiner Teil dieser Zone oder allein das Sporangium einseitig berührt wird.

Bei den Wurzeln ist abgesehen von einer höchstwahrscheinlich vorhandenen Querleitung nichts Sicheres über Reizleitung, etwa von der Wurzelspitze aus, bekannt geworden. In den Fällen, wo ein geringer Haptotropismus vorkommt, ist empfindlich sowohl die Wurzelspitze als auch die Streckungszone.

Eine haptotropische und ebenso eine chemotropische Reizleitung ganz eigener Art zeichnet endlich die Blätter von Drosera aus. Nitschke und Ch. Darwin haben nämlich festgestellt, daß durch chemische oder Kontaktreizung irgendeines auf der Blattscheibe befestigten Tentakels, dagegen nicht von denen am Blattrande die übrigen Tentakeln des Blattes durch Reizleitung zu Krümmungen veranlaßt werden können. Diese Einkrümmung wird beeinflußt in ihrer Richtung durch den Ort, von dem aus der Reiz sich ausbreitet. Reizt man also zwei Tentakeln, die in einiger Entfernung vom Blattzentrum einander gegenüber liegen, so krümmen sich die Tentakeln der einen Blatthälfte nach dem einen gereizten Tentakel, die der anderen nach dem anderen. Es handelt sich also augenscheinlich um eine tropistische Reizleitung.

δ) Rheotropismus. Für den Rheotropismus der Wurzeln ist es durch Juels und Newcombes Studien sehr wahrscheinlich gemacht, daß die Reaktion in der Streckungszone sowohl durch direkte Reizung als auch durch Reizleitung von der Wurzelspitze her veranlaßt werden kann. Ja nach Newcombe soll sogar eine rheotropische Krümmung durch Reizleitung in der Wachstumszone eintreten, wenn man ausschließlich die an die Streckungszone angrenzenden ausgewachsenen 10 bis 15 mm langen Teile der Wurzel reizt. Die Empfindlichkeit nehme von der Wurzelspitze basalwärts ab.

ε) Traumatotropismus. Das Bestehen einer Reizleitung ergibt sich aus dem im Abschnitt 2 für den Traumatotropismus Gesagten. Empfindlich ist bei der Wurzel sowohl ein Teil der Streckungszone wie die Spitze, letztere aber in bevorzugtem Maße. Ob in der Spitze der Vegetationspunkt einseitig verwundet werden muß, um eine Reaktion auszulösen oder ob auch schon die Verwundung der Wurzelhaube genügt, das kann man aus den vorliegenden Untersuchungen noch nicht klar ersehen. Sehr eigentümliche traumatotropische Reizleitungsvorgänge beobachtete Nordhausen: Nach seitlichen Verletzungen der Hauptwurzel krümmen sich die neu hervorbrechenden Seitenwurzeln von der Wundstelle weg. Oberhalb und unterhalb der Wunde sind die Wurzeln bemerkenswerterweise nicht von der Wundstelle, sondern ohne wesentliche Veränderung ihres Neigungswinkels in seitlicher Richtung von der Wundfläche abgebogen. Bedingung für diese Reaktionen ist in erster Linie Verwundung der Pericambiums.

ζ) Kamptotropismus. Auch für ihn ist Reizleitung nachgewiesen (vgl. Abschnitt 2).

η) Chemotropismus. Ueber die Reizleitung des chemotropischen Reizes im Blatte von Drosera habe ich schon bei Besprechung der haptotropischen Reaktion das Nötige gesagt.

Was den Chemotropismus der Wurzeln betrifft, so ist auch die Wachstumszone selbst sensibel und zwar sowohl aerotropisch, als auch hydrotropisch und chemotropisch im engeren Sinne. Ob auch eine Reizleitung von der Wurzelspitze her möglich ist, lassen die bisherigen Untersuchungen für den Aerotropismus und den Chemotropismus unentschieden. Dagegen ist eine hydrotropische Reizleitung von der Spitze in die Streckungszone bewiesen.

Polowzow will eine aerotropische Reizleitung auch bei Kotyledonen von Helianthus beobachtet haben: die Reizung, die 2 bis 5 cm unterhalb der Kotyledonen erfolgte, pflanze sich bis zum Kotyledonarknoten aufwärts fort. Diese Angabe bedarf aber der Nachprüfung.

ϑ) Galvanotropismus. Für ihn scheint es durch Gaßner bewiesen (nach Rothert), daß die Empfindlichkeit allein auf die Spitze beschränkt ist, daß die Wachstumszone also nur auf einen zugeleiteten Reiz reagiert. Ist das richtig, so würde der Galvanotropismus sich vom Chemotropismus streng unterscheiden, jedenfalls nicht allein ein solcher sein, aber auch nicht bloß Traumatotropismus.

4c) Länge des Transmissionsweges. Ueber so große Strecken wie beim Tiere pflegen sich freilich die Reize bei den Pflanzen nicht nachweisbar fortzupflanzen. Im Gegenteile: meist läßt sich die Reizleitung nur über ganz kleine Strecken beobachten. Meist erfolgt Reaktion nur wenige Millimeter oder Zentimeter von der gereizten Stelle entfernt: so in den Blättern von Drosera, so bei der Leitung der tropistischen Reize in der Wurzel, des haptotropischen Reizes bei den Ranken und den Pilzen. Auch der phototropische Reiz pflanzt sich in den Graskeimlingen nicht über 3 bis 5 cm von der gereizten Stelle aus fort. Eine sehr viel weitere Ausbreitung des gleichen Reizes kommt dagegen in Stengeln und Blattstielen vor: hier kann die erregte Strecke 10 bis 20 cm betragen. Im übrigen variiert die Länge der erregten Strecke mit den Außenbedingungen (je günstiger diese, um so weiter pflegt sich der Reiz auszubreiten) und mit der Stärke der Reizung. So werden z. B. am Droserablatte bei schwacher Reizung eines Tentakels nur wenige benachbarte Tentakeln erregt. Auch der Ort der Reizung hat Einfluß auf die Reizleitung. Nach Darwin werden z. B. durch Reizung eines zentralen Tentakels bei Drosera weit mehr andere Tentakeln veranlaßt, sich zu krümmen, als durch Reizung eines exzentrischen.

Bei den meisten tropistischen Reizleitungsvorgängen ist es nicht leicht zu ermitteln, ob die Grenze der Reaktion auch die Grenze der Reizausbreitung kennzeichnet, weil die Reaktionszone selbst meist sehr beschränkt ist. Möglicherweise also pflanzen sich manche Reize sehr viel weiter fort, als wir es aus der Reaktion schließen können.

4d) Mechanismus der tropistischen Transmissionen. Die tropistischen Reiztransmissionen sind vor allen anderen Reizleitungsvorgängen durch eine Reihe Besonderheiten ausgezeichnet, die sie zu den interessantesten Leitungsprozessen bei den Pflanzen machen. Um so dringender ist eine Einsicht in ihre Mechanik erwünscht. Die tropistischen Reizleitungsvorgänge bestimmen ja nicht bloß die Qualität der Reizkrümmung, ob diese eine geotropische oder phototropische oder haptotropische usw. sein soll, sondern jedesmal außerdem in welcher Richtung die Krümmung in strenger Abhängigkeit von der Einwirkung des

Reizes auf die perzipierende Zone erfolgen soll. Der Gedanke liegt sehr nahe, daß an der Transmission irgendwelche Diffusionsvorgänge beteiligt sind, die sich von der Reizstelle allseitig ausbreiten und die durch die Richtung der Diffusionsströme die Krümmungsrichtung beherrschen. Genaueres Zusehen zeigt indessen, daß so einfach die Verhältnisse bei vielen tropistischen Reizleitungsvorgängen, vielleicht bei allen, nicht liegen können.

Reizleitungsbahnen. Von größter Bedeutung für die Aufhellung des Mechanismus der Reizübermittelung ist zunächst die Feststellung der Reizleitungsbahnen. Aus den Versuchen, die in dieser Richtung, bisher leider bei nur wenigen Tropismen angestellt sind, scheint hervorzugehen, daß die Leitung ganz allein in lebenden Zellen ohne Beteiligung der toten Gefäßbündelzellen erfolgt oder doch wenigstens erfolgen kann: Durchschneidung der Gefäßbündel und Isolierung der Schnittflächen voneinander hebt die Leitung nicht auf. Ob aber die Leitung vielleicht längs den Gefäßbündeln begünstigt wird, das ist noch nicht näher untersucht worden.

Besonders merkwürdig ist die phototropische Reizleitung: Eine Reizleitung erfolgt nicht bloß, wenn im Grundgewebe gerade Bahnen zwischen Perzeptionsstelle und Reaktionszone erhalten sind, sondern auch, wenn man jede geradlinige Fortpflanzung des Reizes durch zwei quere, von entgegengesetzten Seiten geführte, 1 bis 2 mm voneinander entfernte Einschnitte unmöglich macht, die je bis über die Mitte des Keimblattquerschnittes reichen. Macht man nur einen solchen Einschnitt oder zwei von welcher Seite auch immer: sei es bezogen auf den Lichteinfall von vorn, von einer der Seiten oder von hinten, so tritt stets unterhalb der Wundstelle in den verdunkelten Basalteilen des Kotyledo eine phototropische Krümmung ein, deren Richtung bestimmt wird von der Stelle der Spitze, die einseitig beleuchtet ist. Ja diese Krümmung wird in ihrem Ablaufe durch solche Erschwerungen der Transmission nicht einmal nambaft verlangsamt! Auf dieses positive Resultat hat es keinen Einfluß, ob sich die Ränder der Wunden berühren oder ob sie durch dicke Stanniolplättchen oder aber dadurch voneinander getrennt werden, daß man ein 1 bis 2 mm breites Stück des halben Keimblattumfanges auf der einen Seite mit dem Messer wegnimmt. Daraus wird einmal ersichtlich, daß eine erfolgreiche Transmission ohne Diffusionsvorgänge möglich ist und daß man den Reiz beliebig um die Ecke leiten kann, ohne daß er die Besonderheiten verliert, die der Reaktionszone die Krümmungsrichtung vorschreiben. Der Reiz kann sich also ebenso gut longitudinal wie quer im Grundgewebe fortpflanzen.

Ebensowenig wie die Ausbreitung von Diffusionsvorgängen kann die Ausbreitung einer durch den Lichtreiz veranlaßten chemischen Veränderung des Plasmas, die von der intensivst beleuchteten Stelle der Keimblattspitze innerhalb der lebenden Substanz über die nicht gereizten Teile des Kotyledo erfolgt, hier zu einer befriedigenden Erklärung der Transmission herangezogen werden.

Alle Versuche weisen auf das Bestimmteste darauf hin, daß beim Phototropismus, und ähnliches scheint auch für den Traumatotropismus der Wurzel zu gelten, in irgendeiner Weise schon innerhalb der Perzeptionszone durch den einseitigen Angriff des Reizanlasses und die durch die Reizung ausgelösten Perzeptionsvorgänge festgelegt wird, in welcher Richtung die Krümmung in der Reaktionszone erfolgen soll, und daß ein „polarer Gegensatz", der sich unter dem Einflusse des anhomogenen Außenreizes während der Perzeption eben schon in der Perzeptionszone ausbildet, unabhängig von der Richtung der Reizleitung und von der Lage der Reizleitungsbahnen in die Reaktionszone durch Leitung übertragen wird. Ferner geht aus diesen Versuchen hervor, daß dieser polare Gegensatz nicht schlechthin zwischen der belichteten Hälfte der Perzeptionszone einerseits und zwischen der unbelichteten andererseits entstehen kann, sondern daß er notwendigerweise mindestens in einer jeden lebenden Zelle hergestellt werden muß; andernfalls wäre es ja nicht zu verstehen, daß der Reiz um die Ecke geleitet werden kann. Selbst das aber würde kaum genügen, daß die Polarität sich zwischen Vorder- und Hinterseite jeder Zelle ausbildet. Ein solcher Gegensatz könnte bloß dann auf diese Weise durch Transmission von einer Zelle sich auf die nächste in gleichem Sinne übertragen, wenn die Zellen wie die Felder eines Schachbrettes aneinander grenzen würden. Das ist aber nicht der Fall. So bedarf die Frage eingehender Prüfung, ob es nicht notwendig ist, anzunehmen, daß innerhalb des Plasmas einer jeden Zelle die Polarität jedes diskrete Plasmateilchen „befällt" und daß sie durch die lebenden Plasmafäden, die Plasmodesmen, die bei den Pflanzen die lebenden Zellen verbinden, vom Perzeptionsorgane ausgehend über das gesamte Plasma bis in das Reaktionsorgan sich ausbreitet. Auf jeden Fall muß der induzierte polare Gegensatz sich während der Reiztransmission in seiner Orientierung erhalten, mag er nun bei dieser Ausbreitung über ungereizte Stellen von hinten nach vorn, von vorn nach hinten oder seitlich übertragen werden.

Physikalisch-chemische Analogien sind bis jetzt unbekannt.

Schon diese Beobachtungen und Ueberlegungen legen die Annahme nahe, daß wenigstens viele tropistische Reizleitungen nur durch aktive Beteiligung der lebenden Substanz zustande kommen können. Dagegen scheinen freilich komplizierte Versuche von Boysen-Jensen ebenfalls über die phototropische Reizleitung bei Avena zu sprechen. Dieser Forscher will nämlich beobachtet haben, daß der phototropische Reiz auch dann noch in die verdunkelte Basis des Kotyledo geleitet wird, wenn man die Spitze völlig durch einen Querschnitt abtrennt und danach wieder auf den Stumpf aufsetzt. Aus diesen und anderen Versuchen zieht Boysen-Jensen den Schluß, daß doch Diffusionsvorgänge und zwar auf der dem Lichte abgekehrten Keimblatthinterseite für die Reizleitung maßgebend sind. Daß irgendwie wenigstens an der phototropischen Reizleitung die „lebende Substanz" beteiligt zu sein scheint, das geht auch aus der Wirkung hervor, die Außenumstände auf die Reizleitung üben. Die Reizleitung wird gehemmt durch Erwärmung der Leitungsbahnen auf 39 bis 41° und schon geschwächt von 37° an. Ebenso wirkte auf die Reiztransmission hemmend Chloroformwasser (1 Vol. der wässerigen konzentrierten Lösung auf 4 Vol. H_2O), 4% Aethylalkohol-, 1,5% NaCl- und 3,5% KNO_3lösungen, obwohl diese Salzlösungen noch keine Plasmolyse bewirken.

Daß bei der phototropischen Reizleitung die lebende Substanz aktiv beteiligt sein muß, dafür sprechen auch die höchst interessanten, neuerdings durch van der Wolk bestätigten Beobachtungen von Rothert, daß der phototropische Reiz sich in den Graskeimlingen nur basalwärts, aber gar nicht spitzenwärts ausbreitet, während nach von Guttenberg der geotropische Reiz sich bei denselben Organen basal- und spitzenwärts und nach Němec der traumatotrope Reiz sowie nach Newcombe der rheotrope Reiz in der Wurzel ebenfalls nach beiden Richtungen sich ausbreiten. Eine solche Polarität in der Transmissionsrichtung ist bei Reizleitungsvorgängen, die in Pflanzenteilen beobachtet sind, nichts ganz Ungewöhnliches. Freilich ist für tropistische Reize ähnliches nur noch bei Droserablättern beobachtet worden: In den randständigen Blatttentakeln kann der motorische Reiz nur von den Drüsenköpfchen bis zur Basis, nicht aber weiter ins Blatt zu den übrigen Tentakeln geleitet werden. Die äußeren Reihen der Tentakeln auf der Blattfläche vermögen den motorischen Reiz nur zentripetal und tangential, nicht aber zentrifugal zu leiten. Außerdem pflanzt sich der Reiz besser longitudinal als quer im Blatte fort. Diese Bevorzugung der longitudinalen Richtung äußert sich oft dadurch, daß Reizung der scheibenständigen Tentakeln auf der einen Blatthälfte die andere Hälfte motorisch gar nicht beeinflußt. Die Annahme Darwins, diese Verschiedenheiten bei Drosera hingen mit der Form der reizleitenden Zellen zusammen, kann wohl kaum ausreichend sein.

Aus der Länge der erregten Strecke ist natürlich ein Schluß auf die Reizleitungsmechanik unmöglich.

Die Frage ist berechtigt, ja nötig, ob nicht für alle die Reizleitungen, die in den lebenden Grundgeweben erfolgen, besondere Strukturen, ähnlich wie beim Tiere, ausgebildet sind, die die Reizleitung erleichtern. Darauf gerichtete Untersuchungen verschiedener Forscher haben jedoch ergeben, daß die fibrillären Strukturen, die Němec in den Zellen glaubte nachweisen zu können, nicht existieren. Keinem Zweifel kann es indes unterliegen, daß die Plasmodesmen, die zahlreiche lebende Brücken zwischen den benachbarten Plasmaleibern bilden, für viele Reizleitungsvorgänge notwendige Vorbedingung sind. Auch die Plasmahautgrenzschichten, die jeden Plasmaleib nach außen umgrenzen, sind vielleicht für manche Reizleitungsvorgänge von ganz besonderer Bedeutung.

4e) Geschwindigkeit der tropistischen Reizleitungsvorgänge. Da, wo die Reaktion von der Perzeptionszone entfernt erfolgt, ist der zeitliche Ablauf der Transmissionsvorgänge besonderer Untersuchung wert. Könnte dadurch doch auch ein Einblick in die zeitlichen Verhältnisse der anderen Teile der Reizvorgänge gewonnen werden!

Ebenso wie die Länge der erregten Strecke bei den Pflanzen meist nur kurz ist, so scheint auch, wenn man nach dem Ablaufe der Reaktionen urteilt, die Geschwindigkeit der Reizleitung vielfach recht klein zu sein. Doch muß man bei solchen Rückschlüssen aus der Geschwindigkeit des Reaktionsbeginnes recht vorsichtig sein. Denn die Reaktionszeit ist oft an die Bedürfnisse des Organes angepaßt. Deshalb sind die meisten der ermittelten Werte nur untere Grenzwerte. Möglicherweise erfolgt die Reizleitung oft viel schneller, als sie angeben.

Der haptotropische Reiz pflanzt sich in den Ranken von Cyclanthera pedata mindestens um 3,6 mm in 1 Minute, bei Berücksichtigung der schrägen Reizleitung wohl um das Doppelte fort. In den Droseratentakeln dauert es nach Darwin im günstigsten Falle 10 Sekunden, bis der Reiz vom Tentakelköpfchen aus die

Tentakelbasis krümmt; d. h. er legt mindestens 0,13 mm in 1 Sekunde zurück. Der phototropische Reiz braucht nach Rothert in den Sprossen von Brodiaea congesta zu 0,3 mm 1 Minute.

Da sich indes gezeigt hat, daß wenigstens beim Geo- und Phototropismus die Perzeptionszeit für Reize unmeßbar klein ist, so ist die Frage sehr berechtigt, ob nicht auch die Fortleitung der Erregung sehr viel schneller erfolgt, als diese höchst unvollkommenen Bestimmungen angeben.

5. Die tropistischen Reizreaktionen. Die tropistischen Reizreaktionen sind in dem Artikel „Bewegungen der Pflanzen" behandelt.

6. Abhängigkeit der Tropismen von den Außenverhältnissen. 6a) Allmeines. Außer von den Reizmengen und von den Reizintensitäten ist jeder Tropismus in hohem Maße auch von den sonstigen Außenumständen abhängig, in denen sich die Organe befinden. Eine nähere Untersuchung dieser Abhängigkeit läßt bald erkennen, daß die Tropismen samt und sonders ausgesprochene Lebensvorgänge sind: Sie finden nur statt, solange alle die Bedingungen erfüllt werden, an die auch die übrigen typischen Lebensvorgänge geknüpft sind. Das gilt für solche Außenumstände wie Wärme, Sauerstoff-, Nahrungs-, Wasserzufuhr, Abwesenheit von Giften (und Anästheticis) u. a. Nähert sich einer dieser Faktoren der unteren oder oberen Grenze, jenseits deren Lebensvorgänge nicht mehr ablaufen können, so verlangsamen sich auch die tropistischen Reizvorgänge in allen oder fast allen ihren Teilen: die Reizperzeption ist, scheint es, langsamer, desgleichen alle Phasen der Krümmungsreaktion. Werden diese Grenzen überschritten, so ist früher oder später Starre die Folge. So durchläuft also auch jeder tropistische Reizvorgang die üblichen „Optimumkurven", wie wir sie bei den meisten Lebensvorgängen finden.

Nun haben wir aber in den letzten Abschnitten gesehen, daß jeder tropistische Reizvorgang ein sehr komplizierter Prozeß ist. Deshalb ist zu untersuchen, wie die Aenderung der einzelnen Faktoren der Außenwelt, wie z. B. der Wärme, des Sauerstoffgehaltes usw., auf die einzelnen Teile des tropistischen Reizvorganges wirkt, wie sie die Perzeption, wie sie die Reizleitung, wie sie die unsichtbaren Vorläufer der Krümmung und die Krümmung selbst in ihrem zeitlichen Ablaufe und in ihrer Intensität beeinflußt. Dabei zeigt es sich, daß die einzelnen Teile eines tropistischen Reizvorganges durch die Aenderung eines Außenfaktors ganz verschieden beeinflußt werden können. Derartige Beobachtungen sind natürlich von sehr großer Wichtigkeit, weil sie die Analyse der Tropismen selbst wesentlich erleichtern und vertiefen helfen. Freilich sind in dieser Hinsicht nur die ersten Ansätze gemacht. Das hat seinen guten Grund darin, daß auch die Zergliederung der Tropismen selbst erst vor etwa 20 Jahren mit größerer Energie begonnen wurde. Jede Beobachtung über den Einfluß eines Außenfaktors auf einen Tropismus bedarf natürlich sorgfältigster Analyse. Die Tatsache z. B., daß Verwundungen tropistische Krümmungen vorübergehend aufheben, läßt allein noch keine Entscheidung darüber zu, ob durch den Wundshock die Reizperzeption oder die Reizreaktion oder beides aufgehoben ist. Es genügt ja schon die Ausschaltung eines einzigen Gliedes in der Reizkette, die von dem Perzeptionsvorgang zum Krümmungsprozesse hinüberführt, um die ganze Bewegung zu verhindern!

Ganz besonderes Interesse bieten mit Rücksicht auf die Analyse der Richtungsbewegungen begreiflicherweise solche Fälle, wo die Aenderung eines Außenfaktors die verschiedenen Tropismen eines und desselben Organes in ganz verschiedener Weise verändert oder wo sie sich auf die einzelnen Teile des Reizvorganges verschieden äußert. Aber auch wo das nicht der Fall ist, bleibt die Analyse der quantitativen Abhängigkeit der Teilprozesse jedes Tropismus von der Variation eines jeden Außenfaktors eine wichtige Aufgabe der Forschung.

6b) Verschiedene Beeinflussung der Tropismen eines Organes durch die Außenumstände. Solche Beobachtungen liegen vor für Geotropismus und Phototropismus und zwar von Correns. Entzieht man aeroben Organismen den Sauerstoff, so verlieren sie meist sofort ihr Krümmungsvermögen, wenn die Partiärpressung des Sauerstoffs einen geringeren oder höheren Betrag erreicht hat. Infolgedessen blieben die phototropischen und geotropischen Nachwirkungen bei Keimstengeln aus, als Correns sie nach entsprechend langer Reizung in luftverdünnte Räume brachte. Nur das Hypokotyl von Helianthus annuus krümmt sich noch in fast luftleerem Raume geotropisch, während die phototropische Krümmung ausbleibt, wenn der Luftdruck niedriger als 7,5 mm Quecksilber wird. Aehnliche Unterschiede fand dieser Forscher bei den Hypokotylen von Sinapis alba: geotropische Krümmungen bis zu einem Luftdrucke von 30—37,5 mm, phototropische dagegen nur bis zu 45 mm Quecksilber.

Eine ungleiche Beeinflussung des Photo- und des Geotropismus ist auch durch sogenannte Laboratoriumsluft bekannt geworden. Schon seit längerer Zeit weiß man, daß

verschiedene Keimpflanzen in Laboratoriumsluft, die durch Leuchtgasspuren und manchmal auch durch andere minimale Gasmengen verunreinigt ist, sich intensiver phototropisch krümmen als in ganz reiner Luft. Dies beruht darauf, daß in solcher Luft die geotropische Befähigung auffallend stark herabgesetzt wird, jedenfalls sehr viel stärker als die phototropische. Guttenberg glaubt aus gewissen Versuchen schließen zu können, daß in der Laboratoriumsluft die geotropische Empfindlichkeit, aber nicht die Reaktionsfähigkeit stark sinkt.

6c) Verschiedene Beeinflussung der einzelnen Teile der Reizvorgänge durch die Außenumstände. Eine solche wurde bei diesen Versuchen bereits festgestellt. Als Correns die eben erwähnten Keimstengel bei einer Luftverdünnung geo- oder phototropisch reizte, wo eine Krümmung nicht mehr eintrat, krümmten sie sich nachher auch in gewöhnlicher Luft nicht. Daraus muß man schließen, daß bereits die Reizperzeption bei Sauerstoffmangel ausbleibt. Denn eine Nachwirkung in gewöhnlicher Luft trat auch dann nicht ein, als Correns bei einem solchen Quecksilberdruck phototropisch reizte, der keine phototropische, wohl aber noch geotropische Krümmung zuließ, dadurch aber anzeigte, daß das Wachstum und die Krümmungsfähigkeit durch solche Luftverdünnung noch nicht aufgehoben war.[1]) Aber nicht allein die Perzeption muß in luftverdünntem Raume ausbleiben, auch die letzten Glieder der Reizkette, die zwischen die Reizperzeption und der Krümmungsbewegung eingeschaltet ist, müssen bei solcher Luftverdünnung ausfallen, die an und für sich Reizbeantwortung noch möglich macht: Correns sah nämlich in solcher Luft auch eine in gewöhnlicher Luft begonnene phototropische Krümmung stillstehen. Alle diese Versuche lehren: Verdünnt man die Luft, so hören bei einer gewissen Partiärpressung des Sauerstoffes zuerst die phototropischen Perzeptions- und Transmissionsvorgänge auf, bei noch geringerer Partiärpressung dann auch die Krümmungsprozesse. Die hier berührten Fragen müssen freilich noch eingehender untersucht werden.

Aehnliches stellte Correns für Ranken fest. Bei einem Luftdrucke von 15 bis 30 cm Quecksilber antworteten sie nicht mehr auf Berührung, obwohl eine in gewöhnlicher Luft begonnene Reizkrümmung noch etwas fortschritt, als die Luft stärker verdünnt war. Zuerst also erlischt auch hier das Perzeptionsvermögen, danach erst die Reaktionsbefähigung. Damit in Widerspruch steht freilich eine Beobachtung von Czapek an Keimwurzeln von Lupinus albus, die den geotropischen Reiz auch in O-freier Luft noch perzipieren sollen. Aber auch die Tentakeln von Drosera bleiben nach Ausschluß des Sauerstoffs noch einige Zeit reizbar und krümmen sich auf chemische und mechanische Reize. Ob diese Widerstandsfähigkeit auf der intramolekularen Atmung beruht, ist nicht bekannt.

In ähnlicher Weise wie Luftverdünnung die Teile des Reizvorganges verschieden beeinflußt, scheinen Chloroformierung und Aetherisierung, Einfluß von Kohlensäure und anderen Stoffen, endlich auch niedere Temperatur zu wirken. Doch wird, nach den vorliegenden Angaben Czapeks, Steyers, Drabbles und Lakes zu urteilen, hier die Krümmungsfähigkeit früher aufgehoben als das Perzeptionsvermögen. So konnte Czapek in einem bestimmten Stadium der Chloroformnarkose, bei bestimmter Abkühlung u. a. die Keimwurzeln von Vicia Faba und Lupinus albus noch geotropisch reizen, wo eine Krümmung nicht mehr zustande kam.[2]) Die Krümmung trat alsdann durch Nachwirkung ein, nachdem die Versuchsobjekte in normale Bedingungen zurückversetzt worden waren. So krümmten sich Lupinuswurzeln z. B. nachträglich geotropisch, als sie 18 Stunden lang bei 0^0 bis $+ 2^0$ C horizontal gelegt worden waren. Natürlicherweise erfolgt aber die Perzeption in solch ungünstigen Verhältnissen träger als unter normalen.

Auch Verwundung kann das Perzeptionsvermögen anders beeinflussen wie die Reaktion. Wenn man z. B. bei den Keimlingen der Gräser oder bei Wurzeln die Spitze des Keimblattes oder die Wurzelspitze abschneidet, so wird in dem Stumpf für längere Zeit, Stunden oder Tage, das Perzeptionsvermögen aufgehoben (Rothert), während eine vorher begonnene oder doch wenigstens induzierte Reizkrümmung mehr oder weniger unbeeinflußt bleibt, wie auch das Wachstum

[1]) Diese Versuche bedürfen freilich der Wiederholung. Ohno nämlich ist für Helianthushypokotyle zu abweichenden Ergebnissen gelangt. Dieser Forscher sah zwar auch unterhalb 7 mm Quecksilber die phototropischen Krümmungen erlöschen, wenn man die Keimstengel seitlich belichtet. Aber als er die so behandelten Keimlinge in Luft brachte, krümmten sie sich schneller als Kontrollpflanzen, die nicht in verdünnter Luft verweilt hatten. Ohno vermutet also, daß durch Sauerstoffausschluß nicht die Perzeption, sondern einige mittlere Glieder der Reizkette ausgeschaltet werden.

[2]) Nach Grothian freilich unterdrücken Chloroform und andere Anästhetika im Gegensatze zu Czapek das geotropische Perzeptionsvermögen früher als das Reaktionsvermögen. Die Frage bedarf also neuer Untersuchungen.

zwar verlangsamt, aber nicht eingestellt wird. Solche Verwundungen müssen beim phototropischen Reizvorgange die ersten Glieder beeinflussen. Denn Rothert konnte zeigen, daß Verwundung die Fortleitung des phototropischen Reizes schon nicht mehr hemmt. Die phototropische Krümmung tritt als Nachwirkung nämlich auch dann ein, wenn man die Keimblattspitze nach kurzer einseitiger Belichtung eben nur dieser Spitze abschneidet. Uebrigens braucht die Entfernung der Spitze nicht auf alle tropistischen Perzeptionsvorgänge hemmend zu wirken: Dekapitierte Wurzeln können z. B. noch den rheotropischen, den chemotropischen und andere Reize perzipieren.

Alle diese Beobachtungen über die ungleiche Beeinflussung der einzelnen Teile der tropistischen Reizvorgänge durch bestimmte Außenfaktoren sind außerordentlich wichtig. Geben sie uns doch Fingerzeige, daß voneinander verschiedene Vorgänge, die aufeinander folgen, an dem Reizprozesse beteiligt sind. Solcher Vorgänge muß man danach bei jedem Tropismus mindestens drei Gruppen unterscheiden: die tropistische Perzeption, die Transmission, die Reizreaktion mit ihren unsichtbaren Vorläufern.

6d) Quantitative Abhängigkeit der Teilprozesse der Tropismen von der Variation der Außenfaktoren. Nur für ganz wenige Außenumstände ist bisher untersucht worden, wie ihre Veränderung quantitativ die einzelnen Teilvorgänge des tropistischen Reizvorganges beeinflußt. Für alle Teilprozesse sind solche Untersuchungen überhaupt noch niemals durchgeführt worden. Nur die Beeinflussung der Präsentations- und der Reaktionszeit durch die Variation einiger weniger Außenfaktoren wurde ermittelt. So zunächst für die Wärme. Bach hat gezeigt, daß die geotropischen Präsentations- und Reaktionszeiten in enger und zwar durchaus ähnlicher Abhängigkeit von der Temperatur stehen: beide Zeiten werden bei steigender Temperatur von 14° ab (tiefere Temperaturen wurden nicht untersucht) fortgesetzt kleiner, bis sie bei etwa 30° ihr Minimum erreichen. Steigt die Temperatur weiter, so nimmt die Länge beider Zeiten wieder zu. Für die Keimsprosse von Vicia Faba laufen die Kurven für beide Zeiten nach Bach fast dauernd parallel! Eingehendere Versuche über die Beeinflussung der Präsentationszeit durch verschiedene Temperaturen verdanken wir dann Rutgers. Dieser Forscher wollte hauptsächlich feststellen, ob die „Optimumtheorie" Blackmans auch für Reizvorgänge gültig ist. Er erhielt für die Avenakeimlinge eine ganz ähnliche Kurve wie Bach: Abnahme der Zeit von 0° bis 30°, dann wieder Verlängerung. Für die Temperaturen von 5 bis 30° ist die van't Hoffsche Regel für den Einfluß der Temperatur auf chemische Reaktionen gültig: der Koeffizient beträgt für je 10° etwa 2,6. Dagegen erhielt Rutgers für die Reaktionszeiten bei Avena eine ganz andere Kurve wie Bach für Faba: Zwischen 10° und 35° waren sie von der Temperatur ganz unabhängig. Man sieht daraus, wie verschieden zwei Versuchsobjekte sich verhalten können und wie schwer es ohne Untersuchung vieler Objekte sein muß, gewisse Regeln aufzustellen!

Rutgers hat dann weiter noch untersucht, welchen Einfluß die Dauer der Vorerwärmung auf die Präsentationszeiten hat. Bis 25° wurde ein solcher nicht bemerkbar, oberhalb 35° äußerte er sich bloß in einer Schädigung. Sehr seltsam war dagegen der Einfluß der Vorerwärmung bei 30°: Vorwärmung während 1 bis 2 Stunden veranlaßte Verlängerung, längere Zeit dagegen eine bedeutende Verkürzung der Präsentationszeiten gegenüber 25°. Dieses Ergebnis bedarf noch weiterer Analyse. Zieht man diese eigenartige Einwirkung der Vorwärmung in Betracht, so sind die Zahlen, wie Rutgers meint, eine Bestätigung von Blackmans Theorie. Sie zeigen also, daß auch bei gewissen Teilen der Reizprozesse, hier bei der „Erregung", das sogenannte Optimum von sekundären Vorgängen abhängig, demnach nicht konstant ist.

Den Einfluß der Luftverdünnung auf die Präsentations- und auf die Reaktionszeiten ebenfalls für den Geotropismus hat uns Paál kennen gelehrt. Beide Zeiten werden bei den Keimwurzeln von Phaseolus verlängert, um so mehr, je stärker die Luft verdünnt wird. Bei ständigem Aufenthalte in verdünnter Luft ist die Verlängerung der Reaktionszeiten stets größer als die der Präsentationszeiten. Daraus geht zunächst hervor, daß die Luftverdünnung die motorische Phase beeinflußt. So wird die Reaktionszeit auch dann verlängert, wenn man die Luft erst nach Ablauf der geotropischen Präsentationszeit verdünnt. Aus der Verlängerung der Präsentationszeiten folgert Paál, daß außerdem auch die sensorischen Phasen des Reizprozesses durch die Erniedrigung der Sauerstoffpressung verlangsamt werden.

Ein interessantes Ergebnis wurde noch erhalten, als die Wurzeln nur während der Präsentationszeit im luftverdünnten Raume gehalten wurden: Auch bei dieser Versuchsanordnung trat eine Verlängerung der Reaktionszeiten ein, die aber nicht der Verlängerung der Präsentationszeiten entspricht, sondern bedeutend geringer ist. Diese Beobachtung spricht für die Richtigkeit der Auffassung, daß die unsichtbaren Vorläufer der

Reizkrümmung schon vor dem Ablaufe der Präsentationszeit beginnen.

Paál betrachtet die Verlängerung der Reaktionszeiten in verdünnter Luft als Resultante aus der Verlangsamung der sensorischen und der motorischen Phasen und der Ineinanderschiebung beider Phasen.

Auch über den Einfluß von Außenfaktoren auf das Abklingen der Reizvorgänge liegen bereits einige Angaben vor (Czapek, Ohno). Die Methodik bei solchen Versuchen ist einfach: man reizt die Pflanze unter normalen Bedingungen verschieden lange, bringt sie hierauf eine gewünschte Zeit in solche äußere Verhältnisse, die es den Pflanzen unmöglich machen zu reagieren, um danach wieder in normaler Umgebung festzustellen, ob und wie stark nachträglich eine Krümmung eintritt. In photo- und geotropischen Versuchen Ohnos, wobei Sauerstoffmangel als Hemmnis diente, blieb z. B. die Reaktionsfähigkeit nach einer Reizung von 8 bis 10 Minuten $^1/_4$ bis $^1/_2$ Stunde, von 20 bis 30 Minuten 1 Stunde, von 50 bis 60 Minuten $1^1/_2$ Stunden erhalten. Bei allen Versuchen war die Zeit für das Abklingen der „Erregungen" verhältnismäßig länger bei Reizung von Präsentationszeitdauer als von längerer Dauer. Bei beiden Tropismen verkürzt Sauerstoffabschluß die Dauer des Abklingens am meisten, Kälte weniger, mechanische Hemmung am wenigsten. Alle diese Versuche sind aber noch nicht ganz eindeutig, da noch nicht bekannt ist, ob nicht durch die extremen Bedingungen das Reaktionsvermögen leidet und wie stark es leidet.

6e) Umschaltungen von Tropismen durch Außenumstände. Manchmal haben Außenumstände eine sehr eigenartige, umschaltende Wirkung auf die tropistische Befähigung eines Organes. War es zuvor positiv, so wird es durch Aenderung eines Außenfaktors, der nicht selbst der tropistische Reizanlaß ist, negativ oder transversal tropistisch. Es ist natürlich sehr schwer, festzustellen, in welchen Teilvorgang dieser Einfluß eingreifen muß, um eine solche Umschaltung veranlassen zu können.

Namentlich für den Geotropismus sind solche umschaltende Einflüsse bekannt geworden und zwar zunächst in Licht und Wärme. Noll hat diese Erscheinungen als „heterogene Induktion" bezeichnet. Besonders zu erwähnen sind in dieser Hinsicht die unterirdischen Ausläufer von Adoxa moschatellina, Circaea lutetiana u. a., die im Dunkeln transversal geotrop, bei Belichtung aber positiv geotrop sind (Stahl). Die Sprosse mancher Pflanzen sind im Dunkeln negativ geotrop, im Lichte transversal geotrop, also plagiotrop (Glechoma hederacea, Ausläufer von Lysimachia Nummularia, Rubus caesius, Vinca major u. a.). Wieder andere (Rhizom- u. a.) Sprosse, die im Dunkeln transversal geotropisch sind, werden am Lichte negativ geotropisch. Bei Seitenwurzeln veranlaßt Belichtung, daß sich ihr Grenzwinkel um 20 bis 30° verkleinert, d. h. daß sie sich steiler nach abwärts richten (Czapek). Besonders häufig sind solche Umstimmungen bei dorsiventralen, plagiotropen Organen. Hier sind sie aber auch besonders schwer zu beurteilen; denn hier spielen komplizierte Nastieen in den Reaktionserfolg hinein.

Die normalerweise orthotropen oder wenigstens steil aufgerichteten Sprosse von Veronica chamaedrys, Lamium purpureum u. a. nehmen in niedriger Temperatur horizontale Lage ein, wovon man sich im Freien zur Vorfrühlingszeit oft genug überzeugen kann (Vöchting, Lidforss). Verdunkelung bei tiefen Temperaturen macht aber die Sprosse negativ geotropisch. Bei Seitenwurzeln wird der geotropische Grenzwinkel durch Temperaturerhöhung oder durch mangelhafte Wasserversorgung u. a. verkleinert (Nordhausen). Niedere Temperatur macht, scheint es, positiv rheotropische Wurzeln negativ.

Auch Laboratoriumsluft scheint bei manchen Pflanzen den negativen Geotropismus in transversalen umzuwandeln (Neljubow). Zweifellos wird durch solche stimmungsändernde Einflüsse die normale Tiefenlage von Erdsprossen gesichert, die für das Leben mancher Pflanzen Bedingung ist.

An diese Fälle, wo sich der umschaltende Außenfaktor namhaft machen läßt, kann man solche anschließen, wo die Umschaltung auf Störung von Innenbeziehungen, Korrelationen, zwischen verschiedenen Organen beruht. Schneidet man bei Abies oder Picea die Gipfelknospe ab, so richtet sich nach einiger Zeit einer oder mehrere der obersten transversal geotropischen Seitenäste auf, negativ geotropisch werdend. Nicht auf die Dekapitation als eine Verwundung kommt es dabei an, sondern auf die Aufhebung der Beziehungen zwischen Haupt- und Seitensproß, die durch die Tätigkeit des Hauptsproßvegetationspunktes unterhalten werden. Die Umstimmung tritt nämlich auch dann schon ein, wenn man die Gipfelknospe, den Wurzelvegetationspunkt eingipst oder ihn sonstwie inaktiviert.

Auf einer ähnlichen Umschaltung beruht es, wenn bei Papaver durch Abschneiden der Blütenknospe der vorher positiv geotropische Stiel negativ geotropisch wird.

Diese Fälle leiten über zu den zahllosen Umschaltungsvorgängen, die nicht auf Außeneinflüsse oder auf die gewaltsame Aufhebung vorhandener Korrelationen zurückführbar sind, sondern autogen im Laufe des Entwickelungsganges eintreten. So ist ein

Rhizom vielleicht zunächst transversal geotropisch; dann wird auf einmal seine Spitze negativ geotropisch. Die Spitze des Blütenstieles von **Papaver** ist zuerst positiv, später vor dem Aufblühen der Blüten negativ usw. Auf eine ganze Menge solcher Fälle wurde ja schon bei Besprechung der tropistischen Reaktionen hingewiesen.

6f) Sonstige bemerkenswertere Beeinflussungen von Tropismen durch äußere Faktoren. Natürlich ist mit solchen Beobachtungen noch nicht alles erschöpft, was über die Abhängigkeit der Tropismen von den Außenumständen bekannt geworden ist. Auch sonst gibt es noch mancherlei Interessantes, das namentlich für die Beurteilung des tropistischen Verhaltens dieser und jener Organe bei Versuchen wissenswert ist.

Cuscuta z. B. verliert ihre Kontaktreizbarkeit, wenn man die Stengel der einseitigen Schwerkraftwirkung durch Drehung am Klinostaten entzieht. Bei der gleichen Pflanze hat die Kontaktkrümmung das Erlöschen der Kontaktsensibilität in der Stengelspitze zur Folge (Peirce).

Besonders wichtig ist die Beobachtung von Bach und Rutgers, daß die geotropischen Präsentationszeiten bei Keimlingen verschieden sind, je nachdem man sie im Winter oder im Sommer aussäet. Vielleicht ist hier die Laboratoriumsluft von Einfluß (Rutgers).

Daß es nicht gleichgültig ist, wie man die Versuchspflanzen vor Versuchsbeginn behandelt hat, sieht man aus Beobachtungen von Bach: Bei Keimsprossen von Vicia Faba und Phaseolus wirkt ein mehr oder weniger langer Aufenthalt in Temperaturen von 4 bis 10°, der der in optimaler Temperatur stattfindenden Induktion und Reaktion vorangeht, verlängernd auf die Präsentations- und Reaktionszeiten. Selbst während 1 bis $4\frac{1}{2}$ Stunden werden die Folgen der Abkühlung nicht wieder aufgehoben!

Bach beobachtete sogar schon einen Unterschied zwischen solchem Materiale, das bei kühlem und das bei warmem Wetter erzogen war.

Bei Drosera wird die Empfindlichkeit der Tentakeln durch Kalksalze aufgehoben (Correns).

Einen großen Einfluß auf die tropistische Sensibilität scheint bei vielen Organen auch Etiolement zu haben. Nach Dubbels sind etiolierte Cucurbitaceenranken nicht reizbar. Ich selbst habe gelegentlich beobachtet, daß etiolierte Keimsprosse längere geotropische Präsentationszeiten haben als am Licht gezogene. Vielleicht ist das auch beim Phototropismus bedeutungsvoll.

Ebenso wie die Aufhebung bestehender korrelativer Beziehungen zwischen Organen oder Organteilen umschaltend auf einen Tropismus wirken kann, vermag sie in anderen Fällen auch einen Tropismus aufzuheben. Das ist z. B. der Fall bei Tradescantia (Miehe). Durchschneidet man hier ein Internodium, so wird die geotropische Reaktion in dem nächst unteren Knoten aufgehoben bei Tr. fluminensis und zebrina und vermindert bei Tr. virginica. Entscheidend ist dabei weder eine Trennung von Perzeption und Aktion, noch der Wundreiz; entscheidend sind vielmehr Korrelationen zwischen dem Knoten und der Achselknospe aus dem nächst höheren Blatte. Ebenso wie Durchschneidung des Internodiums wirkt infolgedessen auch Zerstörung des embryonalen Gewebes dieser Knospe. Aber auch Inaktivierung der Knospe durch einen Gipsverband, durch Behandlung mit Kohlensäure hat bereits diesen Erfolg.

Vergleichbar mit diesem Einflusse der Achselknospe ist der Einfluß, den die Keimblattspitze mancher Gräser, z. B. von Avena, sowie die Wurzelspitze auf die Tropismen in den rückwärts gelegenen Organteilen haben: Dekapitation dieser Spitzen nämlich wirkt viel stärker hemmend als jede andere selbst noch so heftige Verwundung. Offenbar bestehen zwischen Spitze und Basis besondere, übrigens noch völlig unbekannte korrelative Beziehungen, deren Aufhebung bei dem Einfluß auf die Tropismen entscheidend ist. Man kann diese Beziehungen als tonische Beziehungen bezeichnen.

7. Gegeneinanderwirken zweier tropistischer Reizvorgänge. 7a) Allgemeines. Sehr häufig kommt es in der Natur vor, daß zwei tropistische Reizvorgänge zusammenwirken, dadurch daß gleichzeitig zwei verschiedene anhomogene Reizanlässe vorhanden sind. Z. B. wenn ein orthotroper Stengel sich phototropisch krümmt, so wird er aus seiner geotropischen Ruhelage abgelenkt und gleichzeitig damit einer geotropischen Reizung ausgesetzt, die um so stärker wird, je mehr der Ablenkungswinkel aus der Ruhelage sich vergrößert. Unter solchen Umständen kann natürlich die phototropische Reizkrümmung nicht rein zum Ausdrucke kommen; wirkt ihr doch dauernd eine geotropische Erregung entgegen. Erst wenn man die einseitige Schwerewirkung durch Drehung am Klinostaten ausschaltet, kann sich der Phototropismus ungetrübt vollziehen. Solche Fälle sind recht häufig. Ja, wenn man die autotropische Rückkrümmung als einen Tropismus betrachten will, der den übrigen Tropismen als gleichwertig an die Seite zu stellen ist, dann ist jede tropistische Krümmung überhaupt der An-

stoß zu einem entgegenwirkenden Tropismus, jeder Tropismus also in seiner Endstellung die Resultante mindestens zweier einander entgegengerichteter tropistischer Bestrebungen.

Unter diesen Umständen ist das Problem von größtem Interesse, wie sich zwei Tropismen entgegenarbeiten und was eigentlich von den Reizprozessen einander entgegenwirkt: die Reaktionen, die Transmissionen oder bereits die Perzeptionsvorgänge. Schaltet der eine Tropismus den anderen ganz aus oder ist die Endstellung immer die Resultante aus beiden? Wäre letzteres der Fall, so würde zweifellos für die Resultante die relative Empfindlichkeit des Organes für den einen und für den anderen tropistisch wirkenden Reizanlaß entscheidend sein. Man sieht, die Kenntnis dieser Empfindlichkeiten ist hier erforderlich. Außer acht zu lassen ist aber auch nicht die Möglichkeit, daß die beiden Reizmengen Anlaß zur Bildung eines einheitlichen, ganz neuen Reizzustandes geben, der dann über die Reaktion entscheidet. Die vorliegenden Untersuchungen freilich sprechen nicht immer zugunsten dieser Vorstellung.

7b) Gegeneinanderwirken zweier gleicher Tropismen. Vereinfacht wird natürlich das Problem, wenn nicht zwei verschiedene, sondern zwei gleiche Tropismen einander entgegenarbeiten, oder ein Tropismus und eine andere „Erregung", die aber beide ihren Anlaß in ein und demselben Außenfaktor haben. Wird ein radiäres Organ von entgegengesetzten Seiten gleichzeitig gleich stark tropistisch gereizt, so bleibt jede Reizkrümmung aus. Stellt man also einen Keimling in die Mitte zwischen zwei gleich helle Lichtquellen, so wächst er gerade weiter. Folgen die Reizungen auf den Gegenseiten aufeinander, so hängt der Erfolg ab von der Dauer der Reizungen. Dauert jede Reizung verhältnismäßig lange, so kann die zweite die erste nicht völlig unterdrücken: Dann krümmt sich das Organ zunächst stärker oder schwächer nach der einen Seite, darauf nach der anderen. Reizt man dagegen nur so lange, wie die Präsentationszeit währt, oder wenig länger zuerst auf der einen, dann auf der anderen Seite, so kann die zweite Reizung die erste noch völlig unterdrücken, und die zweite selbst wirkungslos, d. h. ohne äußerlich sichtbare Krümmungsreaktion bleiben. Zielinski hat untersucht, wie lange Zeit („kritische Zeit") man über die Präsentationszeit hinaus reizen darf, ohne daß die Krümmungen hervorgerufen werden: er fand, daß diese Zeitdauer nur sehr kurz ist, wenige Minuten länger als die Präsentationszeit.

Reizt man dagegen auf Gegenseiten gleichzeitig oder nacheinander ungleich stark, so ist das Ergebnis verschieden, je nach der Größe des Unterschiedes zwischen den Reizmengen, die auf der einen und auf der anderen Seite zugeführt werden. Sind sie nur wenig verschieden, so kann eventuell wie bei gleicher Reizung jede Krümmung ausbleiben: sind die Unterschiede größer, so krümmt sich das Organ nach der Seite der stärkeren Reizung, natürlich um so stärker, je größer der Unterschied ist, stets aber schwächer als bei alleiniger Reizung von dieser Seite. Entscheidend darüber, ob der Erfolg ausbleibt oder eintritt, ist die Unterschiedsempfindlichkeit. Wird ihre Schwelle überschritten, so tritt Reaktion ein. Die Unterschiedsempfindlichkeitsschwelle läßt sich niemals von vornherein, etwa ausschließlich aus der Differenz der zugeführten Reizmengen bestimmen, wie neuerdings manche Forscher anzunehmen scheinen. Geradeso wie die Empfindlichkeit, so ist auch die Unterschiedsempfindlichkeit eine spezifische Eigentümlichkeit eines Organes, die für jedes Versuchsobjekt durch besondere Versuche ermittelt werden muß. Verschiedenheiten bei verschiedenen Organen sind zu erwarten. Das Wesen der Unterschiedsempfindlichkeit ist nicht immer leicht zu ergründen. Z. B.: wir reizen ein zuvor verdunkeltes Organ auf zwei entgegengesetzten Seiten einseitig mit ungleich intensivem Licht. Dann ist das Organ in seinem ganzen Umfange von einem gewissen Licht umflutet; dazu kommt dann noch die stärkere Belichtung von der einen Seite als von der anderen. Durch die Versetzung des Organes aus Dunkelheit in Licht wird die phototropische Empfindlichkeit abgestumpft, wie wir früher schon sahen; dazu kommt dann noch die Differenz der einseitig einfallenden Lichter. Hier also scheint die Unterschiedsempfindlichkeit eine komplexe Erscheinung zu sein, die Schwelle eine schwer zu analysierende Größe.

Einfacher liegen die Verhältnisse vielleicht beim Geotropismus: Hier kommen bei Reizung von Gegenseiten nur in Betracht, wie es scheint, der Druck auf der einen Seite und der entgegengerichtete Druck auf der anderen. Verglichen zu werden scheinen nur diese beiden tropistischen Reizzustände. Eine Abstumpfung der Sensibilität durch Ablenkung aus der Ruhelage oder durch Rotation auf dem Klinostaten, entsprechend den Erscheinungen bei Belichtung von Dunkelpflanzen, scheint nicht vorzukommen. Demnach sind vielleicht nicht alle Unterschiedsempfindlichkeitsschwellen gleichwertige Größen!

Größe der Unterschiedsempfindlichkeit. Besonders interessant ist die Tatsache, die sich aus der Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeitsschwellen ergeben hat, daß die Unterschiedsempfindlichkeit viel

größer ist als man früher vermuten konnte. Am genauesten untersucht wurde bisher die Unterschiedsschwelle für den Geotropismus. Hier läßt sich die Intensität des wirksamen Anlasses, wie wir sahen, leicht variieren, indem man die Versuchsobjekte in verschiedenen Neigungswinkeln reizt. Der in jedem Winkel wirksame Anlaß entspricht ja dem Sinus des Neigungswinkels. Man braucht auf dem intermittierenden Klinostaten nur das Organ von Gegenseiten gleiche Zeiten lang intermittierend in verschiedenen Neigungswinkeln zu reizen. Dann ist es leicht festzustellen, wie stark die Neigungswinkel voneinander differieren müssen (Schwellenwinkel), damit die Schwelle überschritten und gerade noch eine geotropische Krümmung hervorgerufen wird. Es liegt auf der Hand, daß die Unterschiedsschwellen für verschiedene Schwellenwinkelpaare sich verhalten müssen wie die Differenzen der Sinus dieser Winkel. Rechnerisch läßt sich dies übrigens mittels des Reizmengengesetzes auch ableiten. Seien zwei Schwellenwinkelpaare α und β, γ und δ, die Reizdauer für jeden Neigungswinkel sei gleich, also T, so sind die zugeführten Reizmengen für die Winkel, wenn man mit dem Symbol Dg die Intensität des Anlasses in der Horizontallage bezeichnet, $DgT \times \sin \alpha$, $DgT \times \sin \beta$, $DgT \times \sin \gamma$, $DgT \times \sin \delta$. Der Unterschiedsschwelle bei dem Winkelpaar α und β entspricht die auf der einen Seite mehr als auf der anderen zugeführte Reizmenge $DgT (\sin \alpha - \sin \beta)$ der für das Winkelpaar γ und δ die Reizmenge $DgT (\sin \gamma - \sin \delta)$. Die Unterschiedsschwellen verhalten sich wie diese Reizmengen, also auch wie $(\sin \alpha - \sin \beta)$: $(\sin \gamma - \sin \delta)$.

Man fand bei der Rotation an der schräg gestellten Klinostatenachse für die Keimsprosse von Vicia Faba nun folgende Werte. Sollte eine Krümmung resultieren, so mußte man mindestens folgende Ablenkungswinkel aus der Ruhelage kombinieren:

90° und 80°, 82° und 76°, 76° und 72°, 54° und 52°, 37° und 36°, $2\frac{1}{2}$° und 2°.

Man sieht daraus zunächst, daß bei geringer Ablenkung aus der Ruhelage bereits Unterschiede von $\frac{1}{2}$° perzipiert werden. Daraus aber geht hervor, daß man zur Vermeidung von geotropischen Krümmungen am Klinostaten bei einer derartigen Rotation die Klinostatenachse so genau wie irgend möglich horizontal stellen muß.

Berechnet man nun für diese Winkelpaare die Differenzen der Sinuswerte, so erhält man folgende Zahlen, für die Differenzen:

90°, 80°	82°, 76°	76°, 72°	54°, 52°
0,0152	0,02	0,019	0,021
	37°, 36°	2,5°, 2°	
	0,014	0,01	

Die Differenz ist also nahezu für alle die „Schwellenwinkelpaare" gleich, und zwar 0,014 bis 0,02! Daß die Zahlen nicht genauer übereinstimmen, hängt sicher damit zusammen, daß man nur rohe Näherungswerte bestimmt hat und noch dazu in ganz wenigen Versuchen. Der abweichende Wert für das Winkelpaar 2,5° und 2° erklärt sich wohl ohne Zwang mit kleinen Fehlern in der Schätzung der Winkel, wie sie bei so kleinen Werten leicht möglich sind. Nimmt man nun die Differenzen der Sinus für alle Winkelpaare als gleich an, so läßt sich das Ergebnis so formulieren: Alle Unterschiedsschwellen für beliebige Winkelpaare, und ebenso die ihnen entsprechenden Reizmengen, verhalten sich wie 1:1, oder noch besser: Immer dann, wenn bei fortgesetzter, entgegengesetzter geotropischer Reizung in beliebigen Ablenkungswinkeln die wirksamen Anlässe um einen gewissen konstanten Betrag differieren, so tritt eine sichtbare Krümmung ein. Dieser Betrag ist bei Vicia Faba-Keimsprossen etwa $Dg \times 0{,}015$ bis $Dg \times 0{,}02$. Daraus aber geht hervor, daß für diese geotropischen Unterschiedsschwellen das Webersche Gesetz nicht gültig sein kann. So klein diese Unterschiedsschwelle auch ist, so fällt sie doch nicht aus dem Rahmen unserer sonstigen Kenntnisse heraus. Hat man doch durch Zentrifugalversuche nachweisen können, daß noch Fliehkräfte von 0,02 g, ja sogar 0,001 g geotropische Krümmungen auslösen können.

Ueber die Unterschiedsschwellen beim Phototropismus liegt eine Untersuchung von Massart vor. Er brachte die Sporangienträger von Phycomyces zwischen zwei gleich starke Lichtquellen und stellte durch Verschiebung der Objekte fest, bei welchem Abstand gerade eben eine Krümmung eintrat, d. h. bei welcher Helligkeitsdifferenz auf entgegengesetzten Seiten die Schwelle erreicht wurde. Dies war der Fall, als die Differenz ca. $^1/_5$ (100:118) betrug, und zwar für die verschiedensten Lichtintensitäten. Massart schließt daraus auf die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes für den Phototropismus. Da aber die phototropischen Reizvorgänge durch die Abstumpfungsvorgänge getrübt werden, die das Licht außerdem zur Folge hat, so bedarf diese Frage wohl noch sehr sorgfältiger, weiterer Untersuchungen. Vielleicht ist die Folge der Abstumpfung eben die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes!

Alle bisher mitgeteilten Tatsachen gelten für physiologisch radiäre Organe. Bei physiologisch dorsiventralen liegen die Verhältnisse oft komplizierter. So schon bei den allseits kontaktempfindlichen, aber nicht allseits haptotropischen Ranken. Reizt man bei ihnen die Oberseiten und die Unterseiten

gleichzeitig oder nacheinander gleich intensiv, so bleibt auch hier jede Reizkrümmung, überhaupt jede äußerlich sichtbare Reizbeantwortung aus, obwohl nur die Reizung der Unterseiten, nicht aber die alleinige Reizung der Oberseiten eine Krümmung zur Folge hat. Reizung der Oberseiten äußert sich bloß in der Hemmung einer Reaktion, die auf Reizung der Unterseiten folgen sollte. Komplizierter wird alles, wenn ein Organ allseits gleich reaktionsfähig, aber auf verschiedenen Seiten verschieden perzeptionsfähig ist, oder schließlich wenn beiderlei Befähigungen verschieden sind. Dafür kennen wir aber noch keine sicheren Fälle.

7c) Gegeneinanderwirken zweier verschiedener Tropismen. Nur das Gegeneinanderwirken des Geo- und Phototropismus wurde bisher untersucht. Es ist ja auch allein in der Natur allgemein verbreitet. Belichtet man Keimsprosse seitlich, so ist die Endstellung bald mehr durch den Geotropismus, bald mehr durch den Phototropismus beherrscht. Häufig ist es auffallend, wie genau die Pflanzen sich durch phototropische Krümmungen in die Richtung der Lichtstrahlen einstellen. Es sieht fast aus, als wirke überhaupt kein Geotropismus dem Phototropismus entgegen. Diese Beobachtung konnte die Vorstellung hervorrufen, daß durch die einseitige Belichtung der Geotropismus völlig ausgeschaltet werde. Wir wissen jetzt, daß davon keine Rede sein kann und daß da, wo Versuche zugunsten dieser Auffassung zu sprechen schienen, der verschiedene Einfluß der Laboratoriumsluft auf Geo- und Phototropismus an dem Erfolg Schuld war. v. Guttenberg hat gezeigt, daß die Endstellung bei seinen Versuchsobjekten stets eine Resultante aus Photo- und Geotropismus ist: Zwei verschiedene Tropismen verhalten sich also ebenso, wie zwei gleiche. Guttenberg verwendete für seine Versuche mit bestem Erfolge die Kompensationsmethode, indem er durch Abstumpfung der Helligkeit untersuchte, wie starke Belichtung eine gegengerichtete geotropische Krümmung gerade aufhebt. Bei Avenakoleoptilen, die horizontal gelegt waren, war das der Fall durch Dauerbelichtung mit 0,0475 H.-K. von unten, bei Brassica Napus-Keimlingen waren 0,4513 H.-K., bei Lepidium sativum 0,5735 H.-K. und bei Agrostemma 0,853 H.-K. nötig. Also schon sehr geringe Lichtintensitäten kompensieren den Geotropismus. Belichtet man nun senkrecht gestellte Keimlinge seitlich mit so schwachem Lichte horizontal einseitig, so ist die Endstellung eine resultierende unter ca. 45° zum Horizonte. Daß der Geotropismus nicht ausgeschaltet ist, sieht man auch daraus, daß Keimpflanzen, die nach der ersten eben beschriebenen Versuchsanordnung stundenlang einseitig belichtet worden waren, innerhalb der normalen Reaktionszeit eine geotropische Krümmung machten, nachdem sie um 180° gedreht worden waren. Wenn sich also bei stärkerer einseitiger Belichtung die Versuchsobjekte in die Richtung der Lichtstrahlen einstellen, so liegt das nur daran, daß die phototropische Reizung die geotropische ungeheuer übertrifft.

Ein auffallendes, noch keineswegs befriedigend erklärtes Ergebnis erhielt der genannte Forscher nun freilich, als er Keimlinge von Avena in horizontaler, inverser oder schräger Lage senkrecht oder unter 45° schräg von unten mit der empirisch ermittelten kompensierenden Lichtstärke belichtete. Nun stellten sich die Keimlinge seltsamerweise immer senkrecht zum Lichteinfalle ein, als wenn sie transversal phototropisch geworden wären.

Auch beim Gegeneinanderwirken zweier verschiedener Tropismen wird man wohl annehmen dürfen, daß die Hemmung nicht bloß auf dem Gegeneinanderwirken der Reizreaktionen beruht. Doch ist diese Frage noch nicht näher untersucht worden.

Literatur. *Allgemeine Literatur über die Tropismen. Die Lehr- und Handbücher der Pflanzenphysiologie: vor allem* **W. Pfeffer,** *Pflanzenphysiologie, 2. Aufl., Bd. II. Leipzig 1904. — Ferner:* **L. Jost,** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Jena 1908. —* **E. G. Pringsheim,** *Die Reizbewegungen der Pflanzen, Berlin 1912, und die dort zitierte Literatur.*

Für einige in neuerer Zeit besonders eingehend untersuchte Fragen kommt noch folgende Literatur in Betracht:

Literatur über die Abhängigkeit der tropistischen Reizvorgänge von der Reizgröße und Dauer der Reizanlässe: **W. H. Arisz,** *Proc. Koninkl. Akad. Wetschapp. Amsterdam, S. 1022, 1911. —* **H. Bach,** *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 44, S. 57, 1907. —* **A. H. Blaauw,** *Recueil Trav. bot. néerland., Bd. 5, S. 209, 1909. —* **F. Czapek,** *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 27, S. 243, 1895; ebenda, Bd. 32, S. 175, 1898; ebenda, Bd. 43, S. 145, 1906. —* **H. Fitting,** *Ber. deutsch. bot. Gesellsch., Bd. 22, S. 361, 1904 und Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 41, S. 221, 1905. —* **P. Fröschel,** *Sitzber. k. k. Akad. Wiss. Wien, Bd. 117, I, S. 235, 1908 und Bd. 118, I, S. 1247, 1909; Naturw. Wochenschr., Bd. 8, S. 417, 1909. —* **A. Maillefer,** *Bull. Soc. vaud. scienc. nat., Bd. 45, S. 277, 1909 und Bd. 46, S. 235, 1910. Proc. verb. soc. vaud. d. scienc. nat., 1909 und 1911. —* **P. Nathansohn und E. Pringsheim,** *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 45, S. 137, 1908. —* **F. C. Newcombe,** *Annals of Botany, Bd. 19, 1905. —* **C. J. Pekelharing,** *Recueil Trav. bot. néerland., Bd. 7, S. 1, 1910. —* **A. Rutgers,** *Diss. Utrecht, 1910. —* **J. Sachs,** *Arbeit. d. bot. Inst. Würzburg, Bd. 2, S. 240, 1879. —* **A. Tröndle,** *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 48, S. 171, 1910.*

Literatur über phototropistische Umstimmung und Abstumpfung: **G. Berthold**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 13, S. 569, 1882.* — **A. H. Blaauw**, *Recueil Trav. bot. néerland., Bd. 5, S. 209, 1909.* — **W. Figdor**, *Wiesner-Festschrift, S. 287, Wien 1908.* — **P. Fröschel**, *Sitzber. d. k. k. Akad. Wiss. Wien, Bd. 118, I, S. 1247, 1909.* — **L. Jost und R. Stoppel**, *Zeitschr. f. Bot., Bd. 4, S. 206, 1912.* **J. af Klercker**, *Oefvers. Vetensk. Akad. Förhandl. Stockholm, Bd. 10, S. 778, 1891.* — **K. Linsbauer und V. Vouk**, *Ber. deutsch. bot. Gesellsch., Bd. 27, S. 151, 1909.* — **M. Miyoshi**, *Bot. Zeitg., Bd. 52, S. 1, 1894.* — **N. J. C. Müller**, *Botanische Untersuchungen, Bd. 1, 1877.* — **F. Oltmanns**, *Flora, Bd. 75, S. 183, 1892* **und** *Flora, Bd. 83, S. 1, 1897.* — **W. Polowzow**, *Untersuch. üb. d. Reizersch. d. Pflanzen, 1909.* — **E. Pringsheim**, *Beitr. z. Biol. d. Pflanzen, Bd. 9, S. 263, 1907 und S. 415; Bd. 10, S. 72.* — **R. Sammet**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 41, S. 611, 1905.* — **E. Stahl**, *Bot. Zeitg., Bd. 38, S. 412, 1880.* — **K. Steyer**, *Reizkrümmungen bei Phycomyces. Diss., Leipzig 1901.* — **P. C. van der Wolk**, *Kon. Akad. Wetschapp. Amsterdam, S. 258, 1911.* — **J. Wortmann**, *Bot. Zeitg., Bd. 48, S. 193, 1885.*

Literatur über die Lokalisation der tropistischen Perzeption: **H. Fitting**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 44, S. 177, 1907 und Bd. 45, S. 83, 1907.* — **E. Pringsheim**, *Beitr. z. Biol. d. Pflanzen, Bd. 9, S. 263, 1907.* — **van der Wolk**, *Koninkl. Akad. van Wetschapp. Amsterdam, S. 327 ff., 1911.*

Literatur über Sinnesorgane: **H. Bach**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 44, S. 57, 1907.* — **J. Buder**, *Ber. deutsch. bot. Gesellsch., Bd. 26, S. 162, 1908.* — **F. Darwin**, *Proceed. Roy. soc. London, Bd. 71, S. 362, 1903.* — **H. Fitting**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 38, S. 545, 1903 und Bd. 44, S. 177, 1907; Ref. Bot. Ztg., Bd. 66, II, S. 351, 1908.* — **G. Haberlandt**, *Physiolog. Pflanzenanatomie, 4. Aufl., 1909; Sinnesorgane im Pflanzenreich, 2. Aufl., 1906; Die Lichtsinnesorgane der Laubblätter, 1905; Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 38, S. 447, 1903; Bd. 42, S. 321, 1906; Bd. 45, S. 45, 1908; Ber. d. deutsch. bot. Gesellsch., Bd. 26a, S. 22, 1908.* — **L. Jost**, *Zeitschr. f. Bot., Bd. 4, S. 161, 1912.* — **H. Kniep**, *Biol. Centralbl., Bd. 27, S. 97, 1907.* — **B. Němec**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 36, S. 80, 1901.* — **F. Noll**, *Ueber heterogene Induktion, 1892.* — **M. Nordhausen**, *Zeitschr. f. Bot., Bd. 2, S. 465, 1910.* — **W. Pfeffer**, *Untersuch. Tübing. Inst., Bd. 1, S. 483, 1885.* — **F. Zielinski**, *Zeitschr. f. Bot., Bd. 3, S. 81, 1911.*

Literatur über den Mechanismus der tropistischen Perzeptionsvorgänge: **F. Czapek**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 32, S. 175, 1898.* — **H. Fitting**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 44, S. 177, 1907.* — **H. Müller-Thurgau**, *Flora, Bd. 59, S. 65, 1876.* — **F. Oltmanns**, *Flora, Bd. 75, S. 183, 1892.* — **W. Pfeffer**, *Druck- und Arbeitsleistung. Abhandl. d. Kgl. Gesellsch. d. Wiss. Leipzig, Bd. 20, 1893.* — **J. v. Sachs**, *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie, 2. Aufl., 1887.* — **Derselbe**, *Arbeit. d. bot. Inst. Würzburg, Bd. 1, 1873 und Flora, Bd. 56, S. 321, 1873.* — **J. Schtscherback**, *Beih. Bot. Centralbl., Bd. 25, I, S. 358, 1910.* — **H. de Vries**, *Landwirtsch. Jahrb., Bd. 9, S. 473, 1880.*

Literatur über den Mechanismus der tropistischen Transmission: **P. Boysen-Jensen**, *Acad. roy. d. scienc. et des lettr. de Danemark, 1911.* — **Ch. Darwin**, *Insektenfressende Pflanzen. (D. v. Carus.) Gesammelte Werke, Bd. 8.* — **H. Fitting**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 44, S. 177 ff., 1907.* — **H. von Guttenberg**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd. 50, S. 289, 1911.* — **B. Němec**, *Die Reizleitung und die reizleitenden Strukturen bei den Pflanzen, 1901 und Studien über Regeneration. Berlin 1905.* — **Th. Nitschke**, *Bot. Ztg., Bd. 18, S. 229, 1860.* — **W. Rothert**, *Cohns Beitr. z. Biol. d. Pflanzen, Bd. 7, S. 1 ff., 1894.* — **P. C. van der Wolk**, *Koninkl. Akad. van Wetschapp. Amsterdam, S. 258 ff., 1911.*

H. Fitting.

IV. Nastieen.

1. Einleitung. 2. Seismonastie (Stoßreizbarkeit). 3. Haptonastie. 4. Chemonastie. 5. Thermo- und Photonastie (Nyktinastie usw.). 6. Andere Nastieen.

1. Einleitung. Im allgemeinen Teil dieses Artikels (S. 216) ist auseinandergesetzt worden, daß man unter Nastieen solche Reizbewegungen (Krümmungen) festgewachsener Pflanzenteile zu verstehen hat, deren Richtung durch die spezifische Natur des Pflanzenorgans selbst bestimmt wird. Die Angriffsrichtung des Reizes ist für die Krümmungsrichtung des Organs nicht das maßgebende; ein einseitig wirkender Reiz führt also qualitativ zu demselben Effekt wie ein diffuser (homogener). Die Asymmetrie der Struktur, welche für das Zustandekommen einer einseitigen Krümmung Voraussetzung ist, ist bei nastisch reagierenden Organen im allgemeinen eine inhärente Eigenschaft dieser Organe. Wenn der Krümmungsreiz an einem allseits gleich empfindlichen und reaktionsfähigen Organ die Anhomogenität erst hervorruft und damit zugleich die Richtung der Krümmung bestimmt, so liegt ja definitionsgemäß ein Tropismus vor. Pflanzenorgane, die im physiologischen Sinne streng radiär sind, können also keine nastischen Bewegungen ausführen; dazu muß vielmehr eine Dorsiventralität gegeben sein.

Nun ist es allerdings keineswegs nötig, daß diese Dorsiventralität eine ererbte, unveränderliche Eigenschaft ist. Es gibt vielmehr eine Reihe von Beispielen, wo das nicht zutrifft. So entwickeln die Brutknospen von Marchantia im Licht einen dorsiventralen Thallus, und zwar wird die dem Licht zugekehrte Seite die dorsale. Ist die Dorsiventralität hier durch das Licht einmal induziert, so ist es nicht möglich, sie durch anders gerichtete Beleuchtung umzukehren, sie ist stabil (Pfeffer). Es ist nun prinzipiell nicht

ausgeschlossen, daß ein Organ auf denselben Reiz, der ihm die stabile Dorsiventralität aufgeprägt hat, nachher nastisch oder auch tropistisch (indem es sich in eine bestimmte Richtung zur Angriffsrichtung des Reizes einstellt) reagiert. Die Vorgänge, die die Herstellung der dorsiventralen Struktur bedingen, haben ja an sich mit den nastischen Reaktionen, die auf dem Vorhandensein dieser Struktur beruhen, nichts zu tun. Wir sehen dabei zugleich, wie ein und derselbe Faktor (in unserem Falle das Licht) in ein und demselben Organ die verschiedensten Prozesse auslösen kann.

In anderen Fällen ist die Dorsiventralität nicht stabil, sondern labil, d. h. sie kann aufgehoben oder verändert (z. B. umgekehrt) werden. Die Gelenke der Phaseolusblätter sind hierfür ein Beispiel. Wir werden unten (Abschnitt 5) darauf zurückkommen.

Der Begriff der morphologischen Dorsiventralität, wie sie bei Blättern und sogenannten zygomorphen (zweiseitigen) Blüten vorhanden ist, braucht sich mit dem der physiologischen durchaus nicht zu decken. Das folgt schon daraus, daß wir eine Reihe von morphologisch radiären Organen kennen, die zu typisch nastischen Bewegungen befähigt sind (gewisse Ranken; gewisse Tentakeln des Droserablattes). Auch werden wir sehen, daß sich ein physiologisch anhomogenes Organ nicht gegenüber allen Reizen, auf die es zu reagieren fähig ist, wie ein dorsiventrales verhalten muß, sondern unter Umständen wie ein radiäres reagieren kann.

Was nun im einzelnen die Natur der physiologischen Dorsiventralität anlangt, so sind da verschiedene Fälle zu trennen. Sie kann nämlich einmal darauf beruhen, daß ein Organ ungleich verteilte Perzeptionsbefähigung besitzt. Dabei sind wieder folgende Untergruppen denkbar:

1. Ober- und Unterseite perzipieren beide den Reiz in (qualitativ) gleicher Weise, die eine Seite ist aber empfindlicher als die andere.

2. Beide Seiten perzipieren den Reiz qualitativ verschieden.

3. Eine Seite perzipiert den Reiz überhaupt nicht.

Zweitens kann das dorsiventrale Organ allseits gleiche Perzeptionsbefähigung, aber ungleiche Reaktionsbefähigung haben. Schließlich ist es möglich, daß sowohl Perzeptions- als Reaktionsbefähigung von vorn herein ungleich verteilt sind.[1])

Alle drei Fälle sind realisiert. Man kann sich nun leicht vorstellen, daß die Anhomogenität noch weiter geht und z. B. auch die beiden Flanken sich dem Reiz gegenüber verschieden verhalten. Das scheint bei gewissen Blütenstielen vorzukommen.

Wir wollen eine nastische Krümmung, bei der die Dorsalseite konvex wird, als dorsalkonvexe oder epinastische bezeichnen, die entgegengesetzte als ventralkonvexe oder hyponastische. Liegt eine nastische Flankenkrümmung vor, so kann man von Paranastie sprechen (Noll). Durch welche Mittel die Krümmung zustande kommt, soll dabei gleichgültig sein. Im engeren Sinne versteht man unter Epi- und Hyponastie Bewegungen, bei denen die Krümmung durch einseitig verstärktes Wachstum zustande kommt (de Vries). Den in einer Ebene verlaufenden nastischen Krümmungen sind schließlich anzugliedern die nastischen Torsionen (Torsionsnastieen), ferner die Faltungs(Plications-)nastieen, die bei Blüten vorkommen.

Wenn eine nastische Reaktion durch Außenfaktoren induziert ist, so nennen wir sie aitionastisch oder paratonische Nastie; findet sie dagegen bei unveränderten Außenbedingungen allein auf Grund innerer Veränderungen statt, so liegt Autonastie (autonome, autogene oder spontane Nastie) vor.

Die aitionastischen Erscheinungen kann man — und wir wollen das im folgenden durchführen — nach den Außenfaktoren einteilen, die sie bewirken. Dann wird man unterscheiden zwischen Photo-, Thermo-, Chemo-, Hydro-, Geo-, Seismo-, Haptonastie, je nachdem Licht, Wärme, chemische Agenzien, Feuchtigkeit, die Schwerkraft, Erschütterungs- oder Kontaktreize die Reaktion hervorbringen. Auf die Autonastie werden wir erst im letzten Kapitel eingehen, bekannteste Beispiel für die auf Stoßreiz sie wird aber aus bestimmten Gründen schon vorher beiläufig behandelt werden müssen.

Wir beginnen mit der Besprechung der sehr eingehend untersuchten Seismonastie.

2. Seismonastie (Stoßreizbarkeit). 2a) Mimosa pudica. Allgemeines. Das erfolgende nastische Reaktion repräsentieren die Blätter der Sinnpflanze (Mimosa pudica). Von jeher haben die auf Berührung erfolgenden augenfälligen Bewegungen dieser Pflanze das besondere Interesse der Beobachter erweckt. Zu einer Zeit, als die Auffassung, daß Pflanze und Tier in physiologischer Hinsicht ihrem Wesen nach übereinstimmen, noch nicht Gemeingut der Wissenschaft geworden war, und als die Bewegungs-

[1]) Das Zustandekommen einer Krümmung setzt natürlich immer eine Asymmetrie in der Reaktionszone voraus. Die obige Gruppierung geht davon aus, daß eine solche a priori als gegeben anzusehen ist. Ist das nicht der Fall und ist auch die Perzeptionsfähigkeit eines Organs allseits gleich verteilt, so liegt ein streng radiäres Gebilde vor, das nur tropistisch, nicht nastisch reagieren kann.

fähigkeit der Tiere als eines der Merkmale galt, das sie von den Pflanzen unterscheidet, da mußten die Reizkrümmungen der Mimosa als eine merkwürdige Ausnahme von der Regel begreifliches Aufsehen erregen. Heute kennen wir zahlreiche ähnliche und verwandte Erscheinungen, die die Sonderstellung der Mimosa in qualitativer Beziehung aufheben. Wir wissen, daß bei anderen Pflanzen die hier beobachteten Vorgänge in prinzipiell derselben oder ähnlicher Weise verlaufen; nur die Geschwindigkeit ist meist erheblich geringer und daher ist man auf diese analogen Prozesse erst später aufmerksam geworden.

Die Blätter der Sinnpflanze sind doppelt gefiedert. Es entspringen an einem Stiel (primärer Blattstiel) dicht nacheinander zwei Paare von Spindeln, die 10 bis 25 Paare Fiederblättchen tragen. Beobachten wir eine sich selbst überlassene Pflanze, die sich unter günstigen Lebensbedingungen befindet und von oben beleuchtet wird, etwa gegen Mittag, so sehen wir die primären Blattstiele schräg nach oben gerichtet und die Spindeln ungefähr in horizontaler Lage; die Blättchen sind wagerecht ausgebreitet (Fig. 1 a). Eine leichte Berührung zugleich schräg nach vorn gerichtete Bewegung aus. Etwa zu gleicher Zeit klappt auch das gegenüberliegende Blättchen nach oben. Beide stellen sich in die Vertikalebene ein, berühren sich mit ihren Oberflächen und bilden mit der Spindel einen spitzenwärts geöffneten Winkel von etwa 35°. Der Punkt, um den die Blättchen sich drehen, ist an der Basis derselben gelegen in einem Organ, welches als Gelenk bezeichnet wird. Wie aus obigem hervorgeht, erfolgt die Drehung nicht einfach um eine wagerechte, der Spindel parallele Achse; da die Blättchen in der gespreizten Lage (Ruhelage) mit der Spindel einen rechten, im zusammengeklappten Zustand dagegen einen spitzen Winkel bilden und ihre Flächen einander parallel in der Vertikalebene stehen, so muß bei der Bewegung nach oben zugleich eine Drehung um den Mittelnerven als Achse erfolgen.

Nachdem die apikalen Fiederblättchen in dieser Weise zusammengeklappt sind, folgen ihnen die zunächst stehenden und die Bewegung schreitet dann schnell bis zur Basis der Spindel fort. Kurz darauf sehen wir plötzlich das gesamte Blatt sich senken. Der Reiz hat sich, ohne daß äußerlich am Blatte eine Veränderung merkbar wäre,

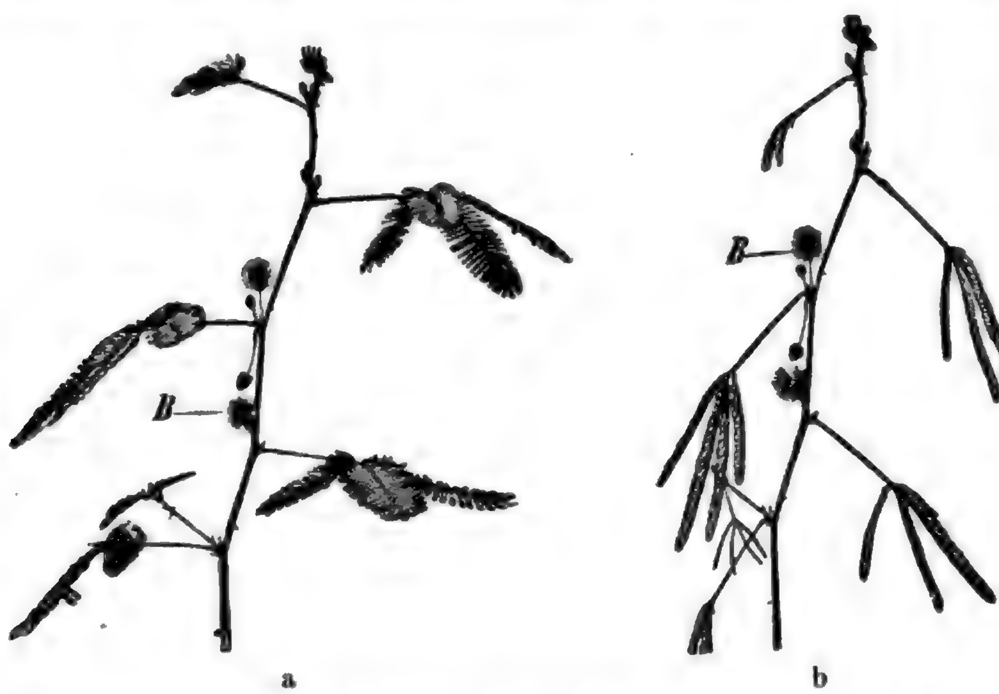


Fig. 1. Mimosa pudica. a ungereizt, b durch Erschütterung gereizt. B Blütenköpfchen. Aus Jost („Bonner Lehrbuch").

eines Blättchens oder anderweitige Reizung genügt, um in wenigen Sekunden das Bild zu verändern. Angenommen, wir hätten ein Blättchen eines der vier an den Spindelspitzen gelegenen Paare gereizt, so lassen sich, sofern der Reiz nicht zu schwach war, folgende Erscheinungen beobachten: Das gereizte Blättchen führt eine nach oben und bis zur Basis des primären Blattstiels fortgepflanzt. Das hier befindliche Gelenk krümmt sich plötzlich ein. Die Fiederblättchen der drei übrigen Spindeln klappen sich alsdann ebenfalls schräg nach oben; entsprechend der Richtung, in der der Reiz zu ihnen gelangt, schreitet hier aber die Bewegung von der Basis nach der Spitze

fort. Gewöhnlich noch ehe die Blättchen des vierten Fiederstrahls sich alle aufgerichtet haben, führen die Gelenke an der Basis der Spindeln (Sekundärstiele) Bewegungen aus, die dahin zielen, die Winkel, die die einzelnen Fiederstrahlen miteinander bilden, zu verkleinern.

Empfindliche Pflanzen lassen eine Uebertragung des Reizes durch den Stamm hindurch nach anderen Blättern erkennen. Bei diesen beginnt die Bewegung dann naturgemäß mit einer Senkung des primären Blattstiels.

In der beschriebenen, in Figur 1b abgebildeten, Lage verharren die Blätter nicht; es setzen sogleich rückläufige Bewegungen ein, die die Blätter in die ursprüngliche Gleichgewichts(Ruhe-)lage zurückbringen (Gegenreaktion). Diese Rückkehr zur Normallage erfolgt stets in einem viel langsameren Tempo als die primäre Reaktion (Näheres darüber unten S. 291).

Wir wollen nun die Reizprozesse etwas näher betrachten. Von vornherein sei betont, daß es sich in diesem Abschnitt nur um die Erscheinungen der sogenannten Stoßreizbarkeit handelt. In einem späteren Kapitel werden wir der Mimosa nochmals begegnen, nämlich bei Besprechung der Schlafbewegungen und werden da sehen, daß die Blätter der Pflanze abends bei einbrechender Dunkelheit langsam in eine Lage einrücken, die der vorhin beschriebenen, nach Stoßreizung eingenommenen äußerlich ähnlich ist. Die älteren Pflanzenphysiologen hielten diese nyktinastischen Bewegungen (s. Abschnitt 5) im Prinzip für identisch mit den durch Stoßreiz erfolgenden. Brücke (1848) und unabhängig von ihm Bert (1866) haben indessen gezeigt, daß es sich um zwei streng zu scheidende Dinge handelt.

Fragen wir zuerst, welcher Art die Reize sind, die die seismonastischen Bewegungen der Mimosablätter auslösen können. Indem man von Stoßreizbarkeit spricht, ist der Reiz als ein mechanischer charakterisiert. Ganz allgemein ist unter einem Stoßreiz jedwede die Pflanze treffende Erschütterung (gewaltsame Lageveränderung der einzelnen Teile der Pflanze zueinander) zu verstehen. Dieselbe kann von festen Körpern, Flüssigkeiten (z. B. auffallenden Regentropfen), Luftbewegungen usw. ausgehen.

Das Wesen der Stoßreizung verstehen wir vielleicht am besten, wenn wir uns an das erinnern, was im vorigen Abschnitt (Tropismen) über den Haptotropismus der Ranken gesagt worden ist. Bei einem Vergleich beider Erscheinungen fallen uns sehr wesentliche Unterschiede auf, die beweisen, daß die mechanische Reizung der Ranken an viel speziellere Bedingungen geknüpft ist als die der Mimosa, und folglich auch auf einer anders ausgebildeten Sensibilität beruhen muß. Es bedarf der Reizung zweier distinkter Punkte, um die Bewegung der Ranke auszulösen; streng lokalisierte Reizung eines einzigen Punktes hat ebensowenig Erfolg wie die gleichmäßige Berührung einer größeren Fläche, die mit Hilfe eines Gelatinestabes, durch einen Wasser- oder Quecksilberstrahl bewirkt werden kann. Auch haben starke Ausbiegungen der Ranke durch Wind keinen Erfolg. Alles das trifft für die Mimosa nicht zu, und darin ist der Unterschied zwischen Tast-(Kontakt-) und Stoßreizbarkeit begründet. Für statische Reize, Steigerungen von Druck bezw. Zerrungen, die äußerst langsam erfolgen, ist aber auch Mimosa unempfindlich.

Außer durch die genannten Reize können nun die gleichen Bewegungen der Mimosenblätter noch auf verschiedene andere Weise hervorgerufen werden. Eine äußerst starke Wirkung, die sich u. a. in der sehr weit reichenden Leitung des Reizes ausspricht, wird z. B. durch Verletzung der Fiederblättchen (Einschnitte, Versengen mittels Brennglases usw.) erzielt. Weiter seien erwähnt: elektrische Induktionsschläge, die besonders deshalb für exakte Untersuchungen sehr geeignet sind, weil sie sich in ihrer Intensität leicht abstufen lassen; chemische Agentien (Ammoniakdämpfe); vielleicht reihen sich hier auch plötzliche Temperaturveränderungen und Lichtwirkungen an.

Jeder Reiz darf einen gewissen Schwellenwert (untere Reizschwelle) nicht unterschreiten, wenn er wirksam sein soll. Der Ausdruck „Reizschwelle" sollte besser durch Reaktionsschwelle ersetzt sein; denn man versteht nach der gebräuchlichen Definition unter einem unterschwelligen Reiz einen solchen, der so schwach ist, daß er bei einmaliger Einwirkung keine sichtbare Reaktion hervorzurufen vermag. Damit ist natürlich nicht gesagt, daß der Reiz in der Pflanze keinen Eindruck hinterläßt. Läßt man nämlich unterschwellige Reize in gewissen Zeitintervallen wirken, so summieren sie sich und erzeugen schließlich eine Erregungsgröße, die ebenso groß ist als bei einmaliger Einwirkung eines oberschwelligen Reizes und folglich zur Reaktion führt. Es handelt sich hier um eine Erscheinung, die tierischen und pflanzlichen Reizprozessen gemeinsam ist und auf die auch schon im vorigen Abschnitt (Tropismen) ausführlicher eingegangen worden ist. Speziell für Mimosa, deren Reizvorgänge von denen anderer Pflanzen in mancher Beziehung abweichen, haben Steinach und Brunn nachgewiesen, daß unterschwellige Induktionsstöße zur

Reaktion führen, wenn sie in genügend schnellem Rhythmus wiederholt werden.

Dabei haben sich einige interessante Beziehungen ergeben: Der Erfolg einer Summationswirkung ist abhängig von der Intensität der unterschwelligen Reize, von deren Frequenz (Zahl der Reize, die in der Zeiteinheit appliziert werden) oder, was dasselbe ist, von dem zeitlichen Intervall zwischen zwei Reizen und schließlich von der absoluten Anzahl der Einzelreize (Induktionsschläge). Es hat sich in Steinachs Versuchen gezeigt, daß diese direkt proportional der Länge der Intervalle und (bei gleichem Intervall) umgekehrt proportional der Intensität des Einzelreizes ist.

Alle diese Sätze haben natürlich nur begrenzte Gültigkeit. Verlängert man die Intervalle immer mehr, so müssen auch die Reizintensitäten erhöht werden, wenn noch Summation möglich sein soll, und schließlich erreichen sie eben so hohe Werte, daß bereits der Einzelreiz die Reaktionsschwelle überschreitet. Als Maximalwert des Intervalls, welches noch eine Summation unterschwelliger Reize gestattet, hat Steinach die verhältnismäßig lange Zeit von 6 Sekunden gefunden.

Reize, die um 30 Volt schwächer sind als der wirksame (schwellige) Einzelreiz, können sich noch summieren. Vermutlich ist das aber bei noch erheblich schwächeren Reizen nicht mehr möglich, denn es ist anzunehmen, daß die Intervalle dann so kurz sein müssen, daß die Reize gar nicht mehr als Einzelreize perzipiert werden, sondern wie Dauerreize wirken (vgl. hierüber das unten bei Dionaea Gesagte). Von diesen wissen wir aber, daß sie nicht wirksam sind. Man würde sonach auch von einer Schwelle der Summationsreize (Summationsschwelle) reden können, womit allerdings keineswegs gesagt sein kann, daß Reize, die unterhalb dieser Schwelle liegen, nicht mehr perzipiert werden.

Das führt uns zu der Frage, worauf es eigentlich bei der Perzeption des Stoßreizes ankommt. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß wir es hier mit anderen Verhältnissen zu tun haben als etwa beim Photo- oder Geotropismus. Denn nicht sowohl auf die Zeit, während der ein Reiz von gleichmäßiger Intensität einwirkt, kommt es an, als vielmehr auf das Gefälle des Reizes, mit anderen Worten auf die Geschwindigkeit, mit der die Reizintensität sich verändert. Wenn auch die Intensität keineswegs gleichgültig ist, so sind doch hier die Auslösungsvorgänge innerhalb der Pflanze an andere Bedingungen geknüpft als etwa beim Photo- oder Geotropismus, wo Licht und Schwerkraft als Reize einen mehr stationären Charakter haben. Somit kommt bei der Stoßreizbarkeit dem Präsentationszeitbegriff gewiß nicht die Bedeutung zu, die er bei letzteren hat, denn wenn es wohl auch nicht völlig gleichgültig ist, wie lange Reize verschiedener Intensität nach vollendetem Anstieg ihre Stärke bewahren, so ergeben sich doch sicher nicht so einfache Beziehungen, wie sie im Reizmengengesetz (vgl. darüber S. 249) ausgedrückt sind, schon deshalb nicht, weil eben noch ein anderer Faktor, das Gefälle, dazukommt. Es fehlen aber noch ganz die Anhaltspunkte dafür, wie groß das Gefälle sein muß, um eine Reaktion auszulösen, und welche Beziehung zwischen Gefälle und Intensität (Endstärke) des Einzelreizes bestehen muß. Für dieses Gefälle wird sich gleichfalls ein Schwellenwert ergeben müssen, denn wir wissen, daß Reize, die sich „einschleichen", also mit sehr geringer Geschwindigkeit ansteigen, ebenso wie beim tierischen Muskel wirkungslos sind.

Um auf die Reaktionsschwelle des Einzelreizes nochmals kurz zurückzukommen, so ist bekannt, daß sie keine konstante Größe ist, sondern vom Zustand der Pflanze, der durch innere und äußere Bedingungen beeinflußt wird, sehr wesentlich abhängt. Niedere wie hohe Temperaturen (die noch keineswegs die Tötungsgrenze zu erreichen brauchen) erhöhen die Schwelle; unterhalb 15° und oberhalb 40° befindet sich die Pflanze in einem Starrezustand (Kältestarre, Wärmestarre, Sachs 1863); sie reagiert auf Stoßreize nicht mehr, die Schwelle ist also unendlich groß oder mindestens sehr stark erhöht. In gleichem Sinne wirken Narkotika, zu geringe Feuchtigkeit der Atmosphäre oder des Bodens, länger währende Verdunklung (Dunkelstarre), schließlich wohl alle Faktoren, die die Lebenstätigkeit der Pflanze in ungünstigem Sinne beeinflussen. Auch vom Alter des Blattes hängt die Schwelle ab, dagegen scheint die durch die Schlafbewegungen bedingte jeweilige Stellung des Blattes bei sonst gleichen Bedingungen ohne Einfluß zu sein, ein Umstand, der neben anderen die Unabhängigkeit und Ungleichartigkeit beider Bewegungsarten beweisen würde.

Die Reizzustände, in die das Blatt durch vorausgehende wiederholte Stoßreizung versetzt worden ist, verändern gleichfalls die Reizbarkeit. Wir haben eingangs gesehen, daß nach stattgehabter Reizbewegung das Blatt nach einigen Minuten wieder in den ursprünglichen Zustand (Ruhelage) zurückkehrt. Diese Gegenreaktion tritt z. B. auch dann ein, wenn ein Blatt in kurzen Intervallen längere Zeit gereizt wird. Während aber im ersteren Falle nach Hebung des Blattes ein erneuter Reiz von der gleichen Größe wiederum Senkung herbeiführt, muß im zweiten Falle die Reizung erheblich ge-

steigert werden, um dies zu erzielen. Die Pflanze ist also in ihrer Stoßreizbarkeit abgestumpft; es liegt Erhöhung der Reizschwelle vor. Nach so starker Inanspruchnahme bedarf die Pflanze einer Zeit der Erholung (5 bis 15 Minuten), um in den ursprünglichen reizbaren Zustand zurückzukehren und auf Reize des ursprünglichen Schwellenniveaus zu reagieren.

Die Empfänglichkeit für Reize ist, wie wir gesehen haben, nicht auf diejenigen Teile des Blattes, die die Reaktion ausführen (Gelenke), beschränkt. Durch Versengen der Spitze eines Fiederblättchens, durch Verletzung des Blattstiels, des Stengels, ja sogar der Wurzeln können Reizbewegungen ausgelöst werden. Dabei muß jedoch betont werden, daß nicht jede Verletzung dieser Organe zu Reizbewegungen führt. Es ist unbedingt nötig, daß ein Gefäßbündel von der Verletzung betroffen wird. Man kann z. B. (natürlich unter Vermeidung von Erschütterungen oder von Verbiegung der Gelenke) das Grundgewebe eines Blättchens sehr stark beschädigen, ohne daß die geringste Reizbewegung erfolgt (Bert 1866).

Die Gelenke selbst verhalten sich in dieser Hinsicht ganz anders. So ist seit langem bekannt, daß eine leise Berührung der unteren, behaarten Hälfte des primären Blattstielgelenks zur Einkrümmung führt, während die dorsale Hälfte auch gegen starke Stoßreize unempfindlich ist.[1]) Bei empfindlichen Pflanzen kann schon durch leichtes Verbiegen der der unteren Gelenkhälfte aufsitzenden Haare die Reaktion ausgelöst werden. Die Reizung beruht in diesem Falle jedenfalls auf Zerrungen und Deformationen, die auf das benachbarte Gewebe ausgeübt werden. Eine Lokalisation der Reizempfänglichkeit in dem Sinne, daß nur die Haare den Reiz vermitteln könnten, liegt nicht vor. Die Funktion der Haare ist offenbar in erster Linie eine ökologische, denn sie sind als Gebilde, die aus dem Gewebe hervorragen, Reizen besonders exponiert und werden von ankriechenden oder anfliegenden Insekten usw. leicht berührt und verbogen. In der Abschreckung von Tieren verschiedenster Art liegt aber ohne Zweifel die biologische Bedeutung der schnellen, auf Stoßreize erfolgenden Bewegungen der Mimosablätter.

Wenn wir uns nun der näheren Zergliederung des Reizprozesses bei Mimosa zuwenden, so mag zunächst nochmals betont werden, daß die einzigen wahrnehmbaren Erscheinungen die Reaktionsvorgänge sind. Diese sollen darum zuerst betrachtet werden. Am genauesten ist daraufhin das Gelenk des primären Blattstiels untersucht, das wir hier um so mehr allein berücksichtigen können, als die Krümmungen in den Blättchen- und Spindelgelenken ohne Zweifel im Prinzip ebenso verlaufen.

Wie in dem Artikel „Bewegungen der Pflanzen“ (Bd. I des Handwörterbuchs) ausgeführt ist, beruht die Senkung des primären Blattstiels auf einer Erschlaffung der unteren Gelenkhälfte. Auf den Reiz hin tritt plötzlich eine Turgorsenkung in den Parenchymzellen auf, die dadurch zustande kommt, daß Wasser in die, die Zellen umgebenden Interzellularen ausgepreßt wird. Die eigentliche Ursache dieser Erscheinung, der Mechanismus und Chemismus der Prozesse, die durch den Reiz zunächst im Plasma ausgelöst werden, ist nicht bekannt. Für das Zustandekommen der Wasserausscheidung selbst sind nach Pfeffer vor allem zwei Möglichkeiten in Betracht zu ziehen, zwischen denen eine Entscheidung zu treffen noch nicht möglich war: es könnte die Durchlässigkeit der Plasmahaut plötzlich verändert oder die osmotische Energie des Zellsaftes durch irgendwelche chemische Reaktionen modifiziert werden. Ausgeschlossen ist es, daß die Erschlaffung ausschließlich auf einer Veränderung der Membran beruht.

Was das Ausmaß der Bewegung anlangt, so ist Mimosa ein vielgenanntes Beispiel für einen Reaktionsmodus, der in der Tierphysiologie „Alles oder Nichts“-Typus genannt wird und sich in typischer Weise beim Herzmuskel verwirklicht findet (vgl. den Artikel „Muskeln, allgemeine Physiologie der Muskeln“). Damit soll ausgedrückt sein, daß die Reaktion, also bei Mimosa der Winkel, den beispielsweise der primäre Blattstiel nach der Reizung beschreibt, stets die maximale Größe erreicht. Es handelt sich also nur darum, daß die Reizschwelle überhaupt überschritten ist; wieweit sie überschritten wird, ist für das Ausmaß der Reaktion gleichgültig, sofern natürlich der Reiz nicht so stark ist, daß die Pflanze geschädigt wird. Hier liegt demnach im Vergleich zu vielen anderen Reizerscheinungen ein Unterschied vor. Greifen wir nur zwei der bekanntesten, den Helio- und Geotropismus heraus, so sehen wir, daß da die Größe der Krümmung eines Organs durchaus nicht unabhängig von der Größe des Reizes ist.

Man kann sich leicht davon überzeugen, daß bei Mimosa der Maximaleffekt bei verschiedenartiger und verschieden starker Reizung erzielt wird. Nach leichtem Berühren der unteren Gelenkhälfte krümmt sich der Blattstiel ebenso stark, als wenn ihm der Reiz nach Versengen von Blättchen, Durchschneiden der Sekundärstiele usw. zugeleitet wird. Trotzdem darf nicht übersehen werden, daß unter bestimmten Bedingungen bei

[1]) Nach Bose ist allerdings die Unempfindlichkeit des oberen Gelenkpolsters keine absolute.

Mimosa auch submaximale Reaktionen möglich sind. Pfeffer (1873) reizte z. B. das primäre Gelenk durch Stöße, die in Abständen von 3 Minuten erfolgten. Der primäre Blattstiel führte nach dem ersten Schlag die maximale Senkbewegung aus und hob sich dann wieder, unbeeinflußt durch den ersten oder die beiden ersten folgenden Schläge. Der zweite oder dritte folgende Schlag löste aber wieder eine Reaktion aus, der dann eine erneute Hebung, oft über die ursprüngliche Stellung hinaus, folgte usw. Die Amplitude dieser letzteren Reaktion erreichte nur selten die Hälfte der maximalen, meist blieb sie noch weiter zurück. Brunn hat weiterhin gezeigt, daß sehr junge Blätter von Mimosa Speggazzinii sich noch weiter krümmen, wenn sie nach Erreichung des Umkehrpunktes nochmals stark gereizt werden. Dasselbe gilt u. a. für träge reagierende narkotisierte Blätter. Stets bedarf es in diesen Fällen, um die Fortsetzung der Reaktion zu erwirken, einer Steigerung der Reizgröße gegenüber der ersten Reizung, die die submaximale Krümmung veranlaßt hat. Schließlich mag noch erwähnt sein, daß L. und K. Linsbauer bei den Blättchen durch ganz schwache Stoßreize submaximale Reaktionen erzielt haben.

Die Fragen, wie der Reiz von der Sinnpflanze aufgenommen, namentlich aber, wie und wo er fortgeleitet wird, haben zu zahlreichen Untersuchungen Anlaß gegeben, die aber leider noch nicht zu einem völlig abschließenden Ergebnis gelangt sind. Wir betrachten zunächst den ersten Punkt.

Wenn ein Reiz auf einen Organismus einwirkt, so pflegt man bekanntlich den ersten Prozeß, den er im Protoplasma auslöst, die Perzeption des Reizes zu nennen (s. Abschnitt I dieses Artikels, S. 213). Dadurch wird ein Erregungszustand geschaffen, und wenn dieser eine gewisse Intensität (eine gewisse Erregungshöhe) erreicht, so folgt die Reaktion. Der Ort, an dem die Perzeption stattfindet, kann räumlich getrennt sein von der Reaktionszone. Dafür sind uns Beispiele aus dem vorigen Abschnitt (Tropismen) bekannt. Es muß also von der Perzeptionszone zur Reaktionszone eine Leitung stattfinden. Vom Phototropismus wissen wir, daß von Zelle zu Zelle ein Erregungszustand übertragen wird. Dies ist der häufigste Fall einer sogenannten Reizleitung. Es ist aber auch ein anderer denkbar, nämlich der, daß der Reiz als solcher an irgendeiner Stelle von der Pflanze aufgenommen und zur perzipierenden Region irgendwie (als Reiz, nicht als Erregung!) übermittelt wird. Nehmen wir an, ein Stoff würde von einem bestimmten Gewebe resorbiert und von dort nach einer Region geleitet, in der er eine Reizbewegung auslöst, so würde ein Fall der letzteren Art vorliegen. Noch eine dritte Möglichkeit ist theoretisch gegeben: ein Reiz wird (der Einfachheit halber sei angenommen in der Reaktionszone) perzipiert, löst eine Reaktion aus, und diese Reaktion wird indirekt die Veranlassung einer zweiten, in einem anderen Teile der Pflanze lokalisierten. Das kann in der Weise geschehen, daß in der Pflanze durch die erste Reaktion ein Reiz erzeugt wird, der als solcher fortgeleitet wird und an einer oder mehreren anderen perzeptionsfähigen Stellen Reaktionen auslöst. Diese sekundären Reizvorgänge können mit den ersten dem Wesen nach übereinstimmen oder von ihnen verschieden sein.

Welche dieser Möglichkeiten ist nun bei Mimosa realisiert? Soweit sich aus den vorliegenden Untersuchungen ein Urteil gewinnen läßt, können wir sagen: vielleicht alle drei. Nach dem ersten Schema dürften die Prozesse verlaufen, die sich im Gelenk selbst abspielen. Wenn eine eng begrenzte Partie der unteren Gelenkhälfte durch Berührung gereizt wird, so tritt, wie wir sahen, fast momentan eine Erschlaffung der ganzen Unterseite des Gelenkpolsters ein. Es liegt nahe, anzunehmen, daß die durch den Reiz hervorgerufene Erregung einiger Zellen sich sofort unter Vermittlung der Plasmaverbindungen (deren Vorhandensein hier von Gardiner festgestellt worden ist) nach sämtlichen Zellen der Polsterhälfte fortpflanzt und hier die plötzliche Turgorschwankung erzeugt, die zur Einkrümmung des Gelenkes führt. Wenn sich herausstellen sollte, daß die Wasserausscheidung in allen Zellen etwa gleichzeitig erfolgen würde[1]), so würde es wohl kaum möglich sein, die Erscheinung anders zu verstehen, als unter der Annahme einer ungemein schnellen Fortpflanzung eines Erregungszustandes. Da aber exakte Untersuchungen darüber nicht vorliegen, so ist die andere Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß der in der direkt gereizten Stelle erfolgende Wasseraustritt als Stoßreiz auf die benachbarten Zellen wirkt, so daß für diese die Reaktion der ersteren zum Reize wird. So würde sich gewissermaßen eine „Reaktionswelle" als „Reizwelle" über die ganze reagierende Zone fortpflanzen. Ein Fall dieser Art ist wahrscheinlich verwirklicht, wenn ein oder mehrere Blättchen- oder Spindelgelenke gereizt werden und von dort aus Reizleitung zu anderen Gelenken stattfindet. Uebt man auf ein Fiederblättchen einen Schlag aus, wodurch dessen Gelenk leicht gebogen wird, oder berührt man dieses Gelenk an der reizbaren Hälfte (die hier

[1]) Das würde z. B. der Fall sein, wenn die Reaktionszeit im Verhältnis zur Reizleitungsgeschwindigkeit sehr groß wäre.

oberseits liegt), so tritt bekanntlich die Aufwärtskrümmung des Blättchens ein. Fast gleichzeitig klappt das gegenüberliegende Blatt nach oben, und dann folgen die benachbarten Paare. Hier handelt es sich zunächst einmal um typische Reizvorgänge in den Gelenken. Die Uebermittlung von Gelenk zu Gelenk erfolgt aber nicht durch Leitung einer Erregung, sondern durch Leitung eines Reizes. Ganz korrekt gesagt: die Uebermittlung kann auch dann stattfinden, wenn durch künstliche Eingriffe die Fortleitung einer auf aktiver Tätigkeit lebender Zellen beruhenden Erregung ausgeschlossen ist. Ob unter normalen Verhältnissen eine solche mitbeteiligt ist oder nicht, ist noch nicht näher untersucht worden. Es ist also jedenfalls möglich, daß die Reaktion eines Gelenks, also dessen einseitige Erschlaffung und der damit zusammenhängende Wasseraustritt aus den Zellen, indirekt auf dem Wege der Reiz- (nicht der Erregungs-)Leitung die Ursache der Reizung anderer wird. Sie wirkt als Reiz, der durch das dazwischenliegende Gewebe, aber ohne dessen aktive Beteiligung geleitet werden kann. Bevor wir untersuchen, welcher Art diese Reizleitung ist, wollen wir noch des dritten Falles gedenken, der darin besteht, daß ein Reiz an den verschiedensten Stellen der Pflanze aufgenommen wird, dort aber nicht im eigentlichen Sinne perzipiert werden kann. Von dem Angriffspunkt aus findet dann die Fortleitung desselben nach den Gelenken statt, die allein als perzeptionsfähige Organe anzusehen sind. Das tritt ein, wenn man einem Fiederblättchen die Spitze abschneidet oder absengt, ohne daß das Blättchen dabei irgendwie bewegt wird, oder wenn man in den Stamm der Pflanze einen bis in den Siebteil vordringenden Einschnitt macht usw.

Es wurde schon oben betont, daß derartige Verletzungen nur dann wirksam sind, wenn Gefäßbündel getroffen werden. Allein in diesen kann sich der Reiz fortpflanzen, und zwar sind, wie sich bei näherer Untersuchung herausgestellt hat, die Siebteile die eigentlich vermittelnden Elemente (Haberlandt 1890). Wenn wir die Frage noch näher präzisieren und entscheiden wollen, welche Zellen des Siebteils in Betracht kommen, so können wir zunächst feststellen, daß die die Siebteile umgebende Hartbastscheide nicht an der Reizleitung beteiligt ist. Haberlandt (1890) hat die Ansicht näher zu begründen gesucht, daß langgestreckte, schleimführende Elemente („Schlauchzellen") die eigentlichen Reizleitungszellen darstellen. In diesen Zellen, deren Plasmakörper durch Plasmodesmen, die die fein durchbrochenen Querwände passieren, in Verbindung stehen, sollen sich hydrostatische Druckdifferenzen fortpflanzen, die in den Gelenken als Stoßreize perzipiert werden und Reaktionen auslösen. Daß die Reizleitung in der Fortpflanzung irgendwelcher Druckschwankungen besteht, war schon von früheren Beobachtern (z. B. Sachs, Pfeffer) angenommen worden. Eine solche Annahme wird besonders nahe gelegt durch die seit langem bekannte Tatsache, daß bei einer Verwundung von Blatt oder Stamm der Mimosa aus dem Gefäßbündel ein Flüssigkeitstropfen hervorschießt. Damit ist natürlich plötzlich eine lokale Druckverminderung gegeben, deren Wirkung sich wegen der sogleich folgenden Ausgleichsbewegung in weit von der Wunde entfernte Teile der Pflanze erstrecken muß. Während man nun früher annahm, der (nur bei Anschneiden des Gefäßbündels) hervorquellende Tropfen stamme aus dem Xylem, und demgemäß in dieses die Reizleitung verlegte, hat Haberlandt dargetan, daß er aus dem Siebteil stammt. Von Fitting (1904) ist dies auf anderem Wege bestätigt worden. Ist nun die Reizfortpflanzung nach erfolgtem Einschnitt tatsächlich an den Austritt des Flüssigkeitstropfens geknüpft, so wäre es für den Nachweis, daß die Schlauchzellen des Siebteils die reizleitenden Elemente sind, natürlich von größter Bedeutung, wenn sich einwandfrei zeigen ließe, daß der Tropfen tatsächlich aus den Schlauchzellen, und nur oder wenigstens zum weitaus größten Teil aus diesen austritt. Weder über diese Prämisse, noch über die sich daraus ergebende Konsequenz sind aber die Akten geschlossen. Pfeffer (1873) hat bereits gezeigt, daß schon nach sehr kleinen Einstichen, bei denen keine wahrnehmbare Tropfenausscheidung erfolgt, Reizfortpflanzung stattfinden kann. Wir wollen hier nicht diskutieren, inwieweit durch diesen Versuch die ganze Auffassung, daß der Reiz sich als Druckschwankung fortbewegt, berührt wird. Tatsache ist jedenfalls, daß andere für Stoßreiz empfindliche Pflanzen wie Biophytum (Haberlandt 1898) und Neptunia (Fitting 1907) keinen Tropfenaustritt bei entsprechender Verletzung erkennen lassen, und wenn dem auch entgegengehalten werden könnte, daß diese Pflanzen vielleicht trotz trägerer Reaktion (die ja ausschließlich auf mangelnder Reaktionsbefähigung beruhen könnte) gegen Druckschwankungen viel empfindlicher sind als Mimosa, so liegen doch für eine solche Vermutung bislang keine Gründe vor.

Was nun die Beziehungen der Schlauchzellen zur Tropfenausscheidung anlangt, so läßt sich nicht bestreiten, daß sie daran beteiligt sind. Haberlandt hat nämlich gezeigt, daß die Stoffe, die sich auf mikrochemischem Wege in dem auftretenden Saft nachweisen lassen, zum Teil tatsächlich in unverletzten Schlauchzellen enthalten sind. Daß sie alle

daher stammen, ist aber nicht erwiesen, und daher läßt sich aus diesen Ergebnissen nicht der Schluß ziehen, die Schlauchzellen seien die alleinige Quelle der Flüssigkeitsausscheidung. Natürlich könnten sie trotzdem die ausschließlichen Bahnen der Reizleitung sein. Doch stehen mit dieser Auffassung einige Tatsachen nicht recht in Einklang. Schon Dutrochet (1837) hat darauf hingewiesen — und Borzi hat diese Beobachtung bestätigt —, daß durch Verwundung von Nebenwurzeln Reaktionen hervorgerufen werden können, und in den Nebenwurzeln fehlen nach Haberlandts eigener Angabe die Schlauchzellen völlig. Wenn damit auch nicht streng erwiesen ist, daß die Schlauchzellen da, wo sie vorhanden sind, im Haberlandtschen Sinne wirken, so ist doch gezeigt, daß diese Auffassung nur beschränkte Geltung haben kann, das um so mehr, als andere sensitive Pflanzen der Schlauchzellen ganz entbehren (Neptunia, Biophytum).

Eine Sichtung des vorhandenen Untersuchungsmaterials führt also zu dem einen sicheren Ergebnis, daß die Reizleitung bei Mimosa in den lebenden Elementen des Siebteils erfolgt. Eine Beteiligung der Lebensfunktionen dieser Zellen ist nicht nötig. Das wird durch Versuche bewiesen, in denen die Reizleitung über Strecken der Spindel oder des primären Blattstiels erfolgt, deren lebende Zellen zeitweise inaktiviert worden waren (durch Narkotisierung [Pfeffer 1873] oder Abkühlung auf 0 bis 2° [Fitting 1903, Bose]). Auch über völlig abgetötete Partien kann sich, wie zuerst Haberlandt (1890), später Cunningham, Mac Dougal und Fitting (1903) gezeigt haben, der Reiz fortpflanzen.

Allerdings ist hierbei zu bemerken, daß das nur für sehr intensive Reize (z. B. nicht für Berührungsreize) gilt. In Fittings Versuchen, deren Ergebnisse mit denen Haberlandts nicht ganz übereinstimmen, genügten nicht einmal stärkere Verletzungen, wie Abschneiden von Blättchen. Um die Reizleitung über die tote Strecke zu erreichen, war vielmehr Abbrühen von Blättchen oder Versengen mit der Flamme nötig. Es erhebt sich da die Frage, ob der Unterschied, der zwischen beiderlei Reizungen (dem Berührungs- und dem Verwundungsreiz) besteht, ein rein quantitativer oder vielleicht ein qualitativer ist. Ja man könnte sogar daran denken, daß die von Schnittwunden ausgehenden Reize in wenigstens zum Teil anderer Weise fortgeleitet werden als die durch Versengen hervorgerufenen. Wenn wir die Annahme zugrunde legen, daß die Reizleitung ausschließlich in einer Uebertragung von Druckschwankungen besteht, so ist nicht recht einzusehen, warum diese bei Ansengen zweier Blättchen erheblich größer sein sollen als beim Durchschneiden aller vier Fiederstrahlen. Pfeffer und Haberlandt haben zwar den Standpunkt vertreten, daß die verschiedenen Reizursachen alle zu gleichartigen Reizen führen, und daß die Reizfortpflanzung in allen Fällen ein grob mechanischer Vorgang ist. Die stärkere Wirkung von Versengung erklärt Haberlandt so, daß Dampfbildung im reizleitenden Gewebe plötzlich eine hohe Drucksteigerung verursacht, die sich auf weite Entfernungen fortpflanzt. Ob diese Erklärung für den obigen Fall ausreicht, bedarf noch des Beweises. Es ist jedenfalls noch nicht gelungen, einwandfrei zu widerlegen, daß beim normalen Verlauf der Dinge Lebensprozesse, wenn auch vielleicht nur indirekt, an der Leitung beteiligt sind. Möglicherweise sind in diesem Sinne Versuche Fittings (1903) zu deuten, der zeigte, daß es nicht gelingt, den Reiz nach den Fiederstrahlen und Blättchen zu übertragen, wenn der Blattstiel unterhalb der abgetöteten Partie durchschnitten wird; dagegen findet eine Leitung durch die letztere nach Durchschneidung oberhalb derselben statt. — Die Hervorhebung dieses Umstandes darf uns jedoch nicht übersehen lassen, daß sehr viele und gewichtige Gründe für eine grobmechanische Uebertragung des Reizes in den Gefäßbündeln in Gestalt einer im Siebteil vor sich gehenden Wasserbewegung sprechen. Nach dem derzeitigen Stande unseres Wissens werden wir also mit größter Wahrscheinlichkeit den mit dieser Wasserbewegung verbundenen Druckschwankungen zum mindesten eine hervorragende Beteiligung bei der Reizleitung zuerkennen müssen.

Nicht ganz leicht ist die Frage zu beantworten, in welcher Weise in den Gelenken die Druckschwankungen von den Gefäßbündeln auf das reizbare Parenchym übertragen werden. Haberlandt hat darauf hingewiesen, daß der zentrale Fibrovasalstrang des Gelenks nicht (wie im Blattstiel) von einer Hartbast-, sondern von einer Kollenchymscheide umgeben ist. Die Kollenchymzellen sind mit dem angrenzenden Gelenkparenchym durch Plasmodesmen verbunden, nicht aber mit den Elementen des benachbarten Siebteils. Eine Reizleitung von letzterem nach dem Gelenkparenchym kann also nicht unter Vermittlung von Plasmasträngen erfolgen. Haberlandt stellt sich daher vor, „daß die Reizübertragung durch die mit der Druckschwankung verbundene Volum- und Gestaltänderung des reizleitenden Gewebes, resp. des reizbaren Parenchyms bewirkt wird". Die Druckschwankungen erzeugen im Kollenchym und schließlich auch im Parenchym des Gelenks Pressungen und Zerrungen, die hier als Stoßreiz perzipiert

werden. Ganz ähnlich kann man sich die Uebermittlung des Reizes von einem gereizten Gelenk auf das Gefäßbündel vorstellen.

Wir wollen noch hinzufügen, daß die indirekte Reizung, etwa die eines primären Blattstielgelenks nach Verletzung eines Endblättchens kein einfacher Vorgang sondern eine Reizsummation ist. Denn die Reaktionen der einzelnen Blättchengelenke wirken ja alle in gleicher Weise als Reize, die nach dem primären Blattstielgelenk geleitet werden. Für die perzipierenden Gelenkzellen wird es keineswegs gleichgültig sein, wie viele solcher Reaktionen stattfinden und in welchen Abständen sie aufeinanderfolgen. Auch bei der Bestimmung der Reizleitungsgeschwindigkeit, der wir uns geich zuwenden werden, ist dieser Punkt zu berücksichtigen, was allerdings bisher nicht geschehen zu sein scheint.

Unter Reizleitungsgeschwindigkeit ist der Weg zu verstehen, den der fortgeleitete Reiz in der Sekunde durchläuft. Die Ermittlung dieser Größe geschieht in der Weise, daß man in verschiedenen Entfernungen von dem Bewegungsorgan, etwa dem Gelenk des primären Blattstiels, reizt und in beiden Fällen die Zeit bestimmt, die vom Beginn der Reizung bis zum Beginn der Reaktion verstreicht (Methode von Helmholtz; Bert 1870, Linsbauer 1908). Angenommen, die Entfernungen wären s und s', die entsprechenden Zeiten t und t', so ist die Reizleitungsgeschwindigkeit $c = \frac{s-s'}{t-t'}$. Die Werte, die man für c erhält, hängen sehr wesentlich von der Art des Reizes ab. Wir sahen bereits, daß bei intensiver Reizung der Reiz sehr weit fortgepflanzt werden kann; unter Umständen können durch einen einzigen Reiz sämtliche Blätter einer Pflanze zur Reaktion veranlaßt werden. Nun ist nicht nur die Länge des Weges, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der er zurückgelegt wird, von der Art der Reizung abhängig. Linsbauer fand bei Verletzung mit einem erhitzten Platindraht für c den Durchschnittswert 7,47 mm/Sek., bei Verletzung infolge Einschnitts in die Dorsalseite des primären Blattstiels 31 mm/Sek., nach Durchschneiden desselben sogar als Minimalwert 100 mm/Sek. Diese Zahl ist im Vergleich zu anderen pflanzlichen Reizleitungsvorgängen enorm hoch, steht andererseits aber beträchtlich zurück hinter dem, was wir über die Reizleitungsgeschwindigkeit im tierischen Organismus wissen. Nach Helmholtz' Messungen (1850) pflanzt sich z. B. in den motorischen Nerven des Frosches die Erregung im Mittel 26,4 m in der Sekunde fort, beim Menschen in der gleichen Zeit 30 bis 40 m.

Mit Rücksicht auf das, was wir oben über das Wesen der Reizleitung gesagt haben, gewinnen diese Zahlen noch in anderer Beziehung eine Bedeutung. Sie zeigen nämlich, daß der durch Erhitzung bewirkte Reiz sich wesentlich langsamer fortpflanzt als der durch Ein- oder Durchschneiden hervorgerufene. Wenn es sich in den oben (S. 289) erwähnten Versuchen Fittings allein darum handeln würde, daß Reize, die über die abgetötete Region basalwärts fortgepflanzt werden, einen gewissen Intensitätsgrad erreicht haben müssen, so wäre eher zu erwarten gewesen, daß nach Durchschneidung der vier Blattspindeln eine Uebertragung des Reizes nach dem primären Gelenk stattgefunden hätte, denn es liegt gewiß die Annahme nahe, daß intensivere Reize sich auch schneller fortpflanzen. Da jedoch die Versuche Linsbauers mit denen Fittings nicht ohne weiteres zu vergleichen sind, weil es sich in ersteren um den primären Blattstiel, in letzteren um die sekundären Stiele und Blättchen handelt, so müssen wir die Entscheidung dieses Punktes der Zukunft überlassen.

Es ist nicht anzunehmen, daß die Reizleitungsgeschwindigkeit in allen Teilen der Pflanze die gleiche ist. Aus rein theoretischen Gründen läßt sich voraussagen, daß die Fortleitung einer Wasserbewegung infolge der entgegenstehenden Reibungswiderstände allmählich eine Verlangsamung erfahren muß. Auch ist, wie Haberlandt mit Recht hervorgehoben hat, die Weite des „Strombettes" ein Faktor, von dem die Geschwindigkeit in hohem Maße abhängt. Bei alledem ist zu bedenken, daß die Dinge bei Fortpflanzung über weite Strecken nicht so ganz einfach liegen, weil es sich ja meist nicht um die Leitung von Einzelreizen handelt, sondern weil gewöhnlich infolge der Reaktionen einzelner Gelenke erneute Impulse dazukommen. Auf diese Weise ist das Zustandekommen einer Beschleunigung der Leitungsgeschwindigkeit wohl denkbar; diese dürfte beispielsweise in der Spindel eintreten, wenn ein Spitzenblättchen gereizt wird und sämtliche Blättchengelenke der Spindel schnell nacheinander reagieren. Für die Anwendung der Helmholtzschen Methode ergeben sich daher bei Bestimmungen der Reizleitungsgeschwindigkeit im sekundären Blattstiel einige Komplikationen.

Wir haben nun noch auf die sogenannte Reaktions- oder Latenzzeit einzugehen. Sie wird gewöhnlich definiert als diejenige Zeit, die vom Beginne der Reizung bis zum Beginne (Sichtbarwerden) der Reaktion verstreicht. Um Mißverständnissen vorzubeugen, wollen wir in dieser Definition an Stelle von Reizung Perzeption setzen. Damit ist unzweideutig gesagt, daß die Zeit, während der der

Reiz geleitet wird, nicht in der Reaktionszeit inbegriffen ist; dagegen ist bei anderen Reizvorgängen die Zeit, die während der Transmission einer Erregung vergeht, eingeschlossen, denn dieser muß ja eine Perzeption vorausgehen.

Bose hat zuerst mit Hilfe sehr feiner Registriermethoden die Latenzzeit bei Mimosa pudica bestimmt und gefunden, daß sie etwa $1/_4$ Sekunde beträgt. Zu ganz ähnlichen Werten gelangte Linsbauer (1908), der auch die Reaktionszeit bei indirekter Reizung (Uebertragung des Reizes zum Gelenk durch den Blattstiel) gemessen hat mit dem Ergebnis, daß die so gefundenen Zahlen der Größenordnung nach mit den bei direkter Reizung gefundenen übereinstimmen.

Die Reaktion selbst, also die Senkbewegung des primären Blattstiels, verläuft nicht mit gleichmäßiger Geschwindigkeit. Der pro Zeiteinheit zurückgelegte Weg nimmt zuerst zu und erreicht nach etwa 2 Sekunden sein Maximum. Bert (1870), der die Bewegung horizontal liegender Blätter registriert hat, fand, daß die Bewegung nach 6 bis 7 Sekunden ihren „tiefsten" Punkt erreichte. In Brunns Versuchen schritt die Senkung nach der 6. oder 8. Sekunde noch sehr langsam bis zur 30. fort. Es ist möglich, daß diese Differenz allein darauf beruht, daß hier die Schwerewirkung nicht ausgeschlossen war.

Trockenheit, niedrige Temperatur usw. erhöhen die Reaktionszeit beträchtlich. Systematische Untersuchungen über die Abhängigkeitsbeziehungen der Reaktionszeit von den Außenfaktoren liegen noch nicht vor.

Nur kurz wollen wir schließlich die Eigenschaften der Gegenreaktion betrachten. Sie beginnt gleich, nachdem das Blatt seinen tiefsten Punkt erreicht hat, schreitet zuerst sehr langsam, dann etwas schneller und recht gleichmäßig fort. In einem Versuch Brunns hob sich der primäre Blattstiel pro Minute um etwa 3°. Die Ausgangslage wird bei der Gegenreaktion meist überschritten (Pfeffer 1873). Kurz vor Erreichung des höchsten Punktes, die in dem erwähnten Fall in 28 Minuten erfolgte, tritt wieder eine Verlangsamung ein. Alsdann findet eine erneute, geringere Senkung statt, der abermals eine Hebung folgt. Es liegt also nicht eine einfache rückläufige Bewegung vor, sondern Oszillationen, wie sie ja auch bei autotropischen Ausgleichsbewegungen nach Stengelkrümmungen usw. (vgl. Baranetzky) häufig zu beobachten sind.

Wir haben Mimosa etwas ausführlicher behandelt, weil sie unter den seismonastisch reagierenden Pflanzen die am eingehendsten studierte ist. Trotzdem sind, wie wir sahen, noch viele Lücken auszufüllen, und das gilt in weit höherem Maße für diejenigen Pflanzen, deren wir in diesem Zusammenhang kurz gedenken müssen.

Die gleiche Stoßreizbarkeit wie bei Mimosa, wenn auch nicht in derselben quantitativen Ausbildung, scheint einer anderen Gattung der Mimosaceenfamilie zuzukommen: Neptunia. Auch in den nahe verwandten Familien der Papilionaceen und Caesalpiniaceen finden sich zahlreiche Vertreter, die mit dieser Eigenschaft begabt sind, die Reaktion ist jedoch bei allen wesentlich träger. Erwähnt seien die Gattungen Gleditschia, Robinia, Aeschynomene, Smithia. Im übrigen sei verwiesen auf die Arbeiten von Dassen und Meyen und die Zusammenstellung Hansgirgs (1893 und 1896). Wir wollen hier nur kurz auf die Oxalideen hinweisen, die einige Besonderheiten darbieten. Der bekannte Sauerklee (Oxalis acetosella) ist stoßempfindlich, doch sind sehr kräftige Schläge nötig, um die Bewegung der Blättchen zu veranlassen. Die letztere besteht hier zum Unterschiede von Mimosa in einer Senkung. Reizübertragung von einem Blättchen zum anderen findet bei Oxalis auch nach Verwundung nicht statt. Viel empfindlicher ist Biophytum sensitivum, die nächst Mimosa am besten untersuchte sensitive Pflanze (Haberlandt 1898). Auch sie senkt ihre Blättchen nach Reizung. Der Hauptblattstiel (Spindel) der einfach gefiederten Blätter besitzt kein Bewegungsvermögen. Berührungsreize wirken ebenso wie bei Mimosa schwächer als Verwundungen; sie werden nur über geringe Strecken geleitet. Das Abschneiden eines Endblättchens bewirkt dagegen die Senkung sämtlicher Fiederblättchen des betreffenden Blattes und bei empfindlichen Pflanzen sämtlicher übrigen Blätter. Der maximale Ausschlag eines Blättchens dürfte die Senkung bis zur Vertikalstellung und zum Zusammenschlagen mit dem gegenüberliegenden, die gleiche Bewegung ausführenden Blättchen sein. Diese Stellung wird aber nicht auf direktem Wege erreicht, auch bei sehr starker Reizung nicht, sondern durch Oszillationen. Durchschneidet man ein Blättchen, so senken sich die aufeinanderfolgenden Blättchen zunächst, kehren aber plötzlich nach $1^1/_2$ bis 3 Minuten auf halbem Wege um. Dieser vorübergehenden Hebung, die die Blättchen nicht bis zur Ausgangslage zurückführt, folgt erneute Senkbewegung mit tiefer liegendem Wendepunkt und so fort bis zur Erreichung der senkrechten Lage. Aus dieser kehren die Blättchen dann nach längerer Zeit zur ursprünglichen Horizontalstellung zurück. Schwache Wundreize wirken insofern anders, als sie nicht zur maximalen Senkung führen. Der Kehrpunkt der zweiten Senkbewegung liegt hier bereits höher als der der ersten.

Sonach gehört die Reaktion von Biophytum nicht dem „Alles oder Nichts"-Typus an. Doch ist sie darum von Mimosa nicht so verschieden als das auf den ersten Blick scheinen möchte. Was die Oszillationen anlangt, so sind sie, wie wir sahen, ja auch bei Mimosa, wenngleich in erheblich geringerem Maße vorhanden. Submaximale Reaktionen treten zwar bei Mimosa unter normalen, günstigen Lebensbedingungen gewöhnlich nicht auf, wir wissen aber, daß sie auftreten können, und das verringert den Unterschied. — An den meist wenig empfindlichen Biophytumpflanzen unserer Gewächshäuser lassen sich übrigens die oben beschriebenen Erscheinungen nicht oder bei weitem nicht so deutlich beobachten wie am natürlichen Standort.

Das bisher Gesagte bezieht sich auf Pflanzen, für die die Sammelbezeichnung „sensitive" Pflanzen gebraucht wird. Daß diese Bezeichnung heute als veraltet gelten muß, bedarf keiner näheren Erklärung mehr, denn das auffällige Reaktionsvermögen auf geringfügige Reize hin, das zu dem Namen geführt hat, ist in prinzipieller Hinsicht keine Besonderheit. Die Annahme eines Empfindungsvermögens bei diesen Pflanzen, also psychischer Qualitäten, eine Annahme, die durch das Wort sensitiv nahegelegt wird, ist aber heute ebenso gut oder schlecht begründet wie zur Zeit der Entdeckung der Mimosa. Die Lösung dieser Frage ist auf empirisch-experimentellem Wege nicht möglich und gehört nicht in das Gebiet der Physiologie. Ob man sie überhaupt für lösbar hält oder nicht, das hängt von dem erkenntnistheoretischen Standpunkt ab, auf dem man steht — und jede Erkenntnistheorie ist unbeweisbar. Das möge hier nur deshalb gesagt sein, weil unter allen reizphysiologischen Phänomenen die der Sinnpflanze vielleicht am ehesten geeignet sind, dem Laien den Gedanken an eine psychische Tätigkeit der Pflanzen nahe zu legen.

Von weiteren seismonastischen Erscheinungen behandeln wir hier noch die Blattbewegungen einiger Insektivoren, die reizbaren Staubgefäße und die reizbaren Narben.

2b) Insektenfressende Pflanzen. Die in Nord-Carolina heimische Venusfliegenfalle Dionaea muscipula (Droseracee) hat Blätter, deren Spreite aus zwei am Rande mit langen spitzen Zähnen versehenen Flügeln besteht (Fig. 2). Die Innenfläche dieser Hälften ist mit zahlreichen Drüsenhaaren besetzt, außerdem finden sich dort je drei steife Borsten (Fühlborsten). Nach Verbiegung dieser Borsten oder Berührung der Innenfläche der Lamina klappen deren Hälften plötzlich nach oben zusammen und die Randzähne greifen ineinander. Die im geöffneten Zustande nach außen konkave Unterseite der Blatthälften wird bei der Einkrümmung konvex, so daß beide Klappen wie zwei Muschelschalen einen ellipsoidischen Hohl-

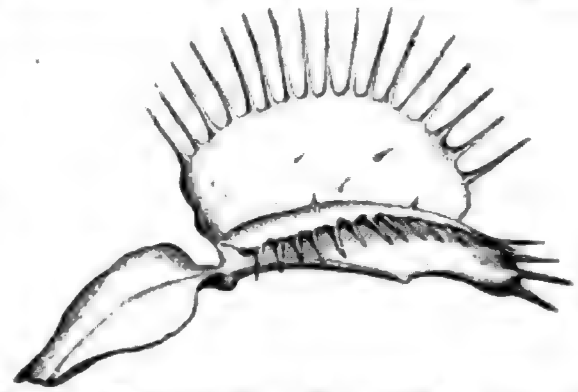


Fig. 2. Blatt der Venusfliegenfalle. Auf der inneren Blattfläche jederseits 3 empfindliche Borsten. Aus Jost. Nach Darwin.

raum einschließen. Wird der Berührungsreiz durch ein auffliegendes Insekt ausgeübt, so wird es gefangen und schließlich mit Hilfe des Sekretes der Drüsen verdaut. Ueber die Vorgänge, die sich dabei abspielen, gibt der Artikel „Insektenfressende Pflanzen" nähere Auskunft. Wir haben hier nur die seismonastischen Vorgänge zu behandeln, die ebenso wie die unten zu erwähnende Chemonastie vom ökologischen Gesichtspunkt als Einrichtungen anzusehen sind, die im Dienste des Insektenfangs stehen.

Daß es sich tatsächlich um Stoßreizbarkeit handelt und Dionaea sich anders verhält als die ausschließlich auf Tast-(Kontakt-)reize reagierenden (haptonastischen) Pflanzen (über diese s. u.), hat schon Ch. Darwin in seinem grundlegenden Werk „Insektenfressende Pflanzen" erkannt, noch ehe von Pfeffer der wesentliche Unterschied dieser beiden Arten von Reizbarkeit genauer präzisiert worden war. Als Reizanlässe kommen also im Prinzip die gleichen in Betracht, die wir bei Mimosa kennen gelernt haben: mechanische Reize der verschiedensten Art, wie Druck und Zug, auffallende Wassertropfen (die allerdings nach Brown und Sharp nur dann wirksam sein sollen, wenn sie die Haare der Innenfläche treffen), leichte Reibung mit einem Gelatinestab (wodurch z. B. Ranken nicht gereizt werden! vgl. Pfeffer 1885), Verwundung, elektrische Reize[1]), plötzliche Temperatur-

[1]) Den Beweis, daß mechanische und elektrische Reize in der Pflanze tatsächlich die gleichen Vorgänge auslösen, haben Brown und Sharp erbracht. Läßt man nacheinander beide Reize in unterschwelligen Intensitäten einwirken, so kann man die Reaktion erzielen. Die Reizwirkungen sind also summierbar, was

differenzen (hervorgerufen durch Benetzung der Blätter mit warmem oder kaltem Wasser), chemische Agentien. Was die Reaktionen auf die beiden letzteren Reize betrifft, so müssen wir sie definitionsgemäß als Thermo- und Chemonastie ansprechen und werden darauf unten kurz zurückkommen.

Zur Perzeption von Reizen scheint das ganze Blatt befähigt zu sein. Doch ist die Empfindlichkeit der einzelnen Teile eine ungleiche. Wird die Oberseite des Blattes durch Druck oder kleine Einschnitte gereizt, ohne daß die Fühlborsten affiziert werden, so tritt ebenso wie nach Berührung der letzteren die Reaktion ein. Nach Macfarlane (1892) ist auch die Unterseite empfindlich. Durchschneiden des Blattstiels führt jedoch nicht zum Zusammenklappen der Spreitenhälften (Darwin); völlig unempfindlich scheint indessen auch dieser nicht zu sein, denn Brown und Sharp erzielten eine Reaktion der Spreite, wenn sie starke Induktionsströme allein durch den Blattstiel leiteten. Was die Spreite anlangt, so mag noch hervorgehoben werden, daß die allgemein angenommene höhere Empfindlichkeit der Fühlborsten gegenüber den anderen Teilen noch nicht exakt bewiesen worden ist. Daß der gleiche mechanische Reiz, wenn er die Borsten trifft, Erfolg hat, wenn er auf die Blattfläche ausgeübt wird, dagegen die Reaktion **nicht** auslöst, ist kein Beweis, denn wir müssen bedenken, daß die Gelenke der Borsten vermöge ihres anatomischen Baues für Reize viel exponierter sind; es müßte also erst gezeigt werden, daß die gleiche Deformation des Plasmas, auf der wahrscheinlich die Reizung beruht (Haberlandt 1906), im einen Falle stärker perzipiert wird als im anderen. Erfahrungen von Brown und Sharp scheinen dagegen zu sprechen. An der Bezeichnung Fühlborsten wird man trotzdem festhalten dürfen.

Damit ein Reiz die Reaktion auslöst, muß er eine gewisse Intensität und ein gewisses Gefälle (s. S. 285) haben, ferner eine gewisse Zeitlang einwirken. Wird ein Druck ganz langsam, von einer sehr geringen Stärke beginnend, gesteigert, oder wird eine Fühlborste ganz langsam gebogen, so erfolgt kein Zusammenklappen der Blatthälften. Die Bestimmungen der Schwellenwerte und die Gesetze der Reizsummation lassen sich aus begreiflichen Gründen auch hier am besten bei Anwendung elektrischer Reize erforschen. Burdon-Sanderson hat bereits festgestellt, daß schwache Induktionsschläge einzeln unwirksam sind, sich aber summieren lassen. Er fand dabei, daß das Zeitintervall zweier aufeinanderfolgender Reize auffallend groß sein kann (2 Minuten). Aehnlich hohe Werte fanden Macfarlane, der die Fühlborsten durch leichte Verbiegung reizte, und Brown und Sharp. Die letzteren gelangten bei ihren Untersuchungen zur Aufstellung folgender interessanter Beziehungen: je länger das Zeitintervall zwischen der Einwirkung zweier unterschwelliger Reize ist, um so mehr Einzelreize müssen appliziert werden, damit eine Schließung des Blattes eintritt. So ergab sich in einem Falle als Mindestzahl der Reize bei einem Intervall von 20 Sekunden 2, bei 3 Minuten 8 bis 9. Hieraus geht hervor, daß nach 3 Minuten die durch einen Einzelreiz hervorgerufene Erregung noch nicht ausgeklungen ist, doch hat die Erregungskurve, wie wir annehmen dürfen, ihr Maximum bereits überschritten und es bedarf nun einer größeren Anzahl von Reizen, um sie zu der Höhe zu steigern, die zur Einleitung der Reaktion nötig ist. Verlängert man die Intervalle noch weiter, so wird man finden, daß schließlich Summation auch bei Anwendung sehr zahlreicher Reize nicht mehr möglich ist. Die Erregung des Einzelreizes ist dann eben ausgeklungen, ehe der nächste folgt. Nach dem, was wir von anderen pflanzlichen Reizerscheinungen kennen (vgl. besonders die oben mitgeteilten Ergebnisse Steinachs an Mimosa), war dies vorauszusehen. Merkwürdiger als dieses Ergebnis ist das andere, daß eine Reizsummation auch dann unmöglich ist, wenn die Zeitintervalle zwischen den Einzelreizen sehr **kurz** sind. Bei dem Versuche, diese Tatsache zu deuten, werden wir daran zu denken haben, daß unterschwellige Reize bei den stoßempfindlichen Organen — soweit sich nach dem vorliegenden Material urteilen läßt — dann, wenn sie als kontinuierliche Reize (Dauerreize) wirken, nicht zur Reaktion führen. Folgen nun mehrere Reize in sehr kurzen Intervallen, so liegt es nahe, anzunehmen, daß sie nicht getrennt, sondern als Dauerreiz perzipiert werden. Wenn wir uns in Analogie mit den menschlichen Sinneswahrnehmungen ausdrücken wollen, so werden wir sagen können: die Einzeleindrücke verwischen sich. Es ist möglich, daß bei so schnell aufeinanderfolgenden Einzelstößen die Empfindlichkeit für das Reizgefälle abgestumpft wird.

Zu den Perzeptions- oder Erregungsprozessen im Dionaeablatt stehen möglicherweise gewisse elektrische Erscheinungen in Beziehung. Wie zuerst Burdon-Sanderson, dann Munk gezeigt haben, bestehen im Dionaeablatt im ruhenden (ungereizten) Zustande elektrische Potentialdifferenzen. So ist z. B. die Basis der Mittelrippe der Lamina negativ gegenüber der

---

nicht der Fall sein würde, wenn sie wesensverschieden wären.

Spitze; auf jeder Spreitenhälfte verläuft etwa parallel dem Rande eine Längslinie, der gegenüber alle anderen Punkte der Lamina elektropositiv sind. Wird nun ein Blatt gereizt, so treten plötzlich Veränderungen dieser elektrischen Spannungsverhältnisse ein, und zwar zeigt das Galvanometer immer zwei Schwankungen (Aktionsströme) an, deren Vorzeichen entgegengesetzt sind. Die erste dieser Schwankungen ist durch einen Strom bedingt, der dem normalen Blattstrom (Ruhestrom) entgegengerichtet ist. Für uns ist der Nachweis von Wichtigkeit, daß sich diese Stromschwankungen auch dann nachweisen lassen, wenn der Reiz unterschwellig war, und zweitens, daß sie tatsächlich schon vor dem Beginne der (unter günstigen Lebensbedingungen meist etwa nach einer Sekunde eintretenden) Reaktion einsetzen.[1]) Es ist erwiesen, daß im abgetöteten Blatt diese Vorgänge nicht auftreten. Im Sinne von Nernst wird man vielleicht daran denken können, daß sie auf Konzentrationsänderungen von Ionen beruhen, deren Zustandekommen an das Vorhandensein der halbdurchlässigen Plasmahaut geknüpft ist.

Von der gereizten Stelle aus verbreiten sich die erzeugten Spannungsänderungen sehr schnell über das ganze Blatt, und die Geschwindigkeit, mit der das geschieht, wurde von Burdon-Sanderson zu 200 mm pro Sekunde bestimmt, bei einer Temperatur von 30 bis 32° und dampfgesättigter Atmosphäre.

Bei Dionaea wird höchstwahrscheinlich nicht wie bei Mimosa der Reiz, sondern ein Erregungszustand fortgeleitet, der also jedenfalls durch die Plasmaverbindungen von Zelle zu Zelle übermittelt wird. Auch darin unterscheidet sich Dionaea von Mimosa, daß die Reizleitung nicht auf die Gefäßbündel beschränkt ist (Darwin), sondern offenbar in allen lebenden Zellen, soweit sie miteinander in Konnex stehen, stattfinden kann.

Die Mechanik der Reizbewegungen ist noch nicht völlig geklärt. Batalin hat gezeigt, daß bei der Einkrümmung Wachstumsvorgänge beteiligt sind. Ob außerdem Turgorschwankungen und Wasserausscheidungen wie in den Gelenken von Mimosa auftreten, wissen wir nicht.

Die Reaktion der beiden Blattflügel erreicht unter normalen Verhältnissen nicht ihren maximalen Ausschlag, weil die Blatthälften nach dem Zusammenklappen sich gegenseitig an weiterer Bewegung hindern. Entfernt man eine Hälfte, so kann die andere sich um fast 90° weiter bewegen (Darwin). Submaximale Reaktionen sind bei Dionaea häufig beobachtet worden. Sie treten z. B. auf, wenn durch niedere Temperatur oder andere Außenbedingungen die Reizbarkeit geschwächt ist; bei der Summation unterschwelliger Reize kann man oft sehen, daß nach einer gewissen Zahl von Impulsen die Bewegung langsam beginnt; unterbleibt dann die weitere Reizung, so schreitet die Reaktion nicht bis zum Maximum fort, sondern geht langsam wieder zurück.

Die Rückkehr zur Oeffnungsstellung (Gegenreaktion) erfolgt auch bei Dionaea viel langsamer als die primäre Reaktion (Schließbewegung).

Auf die Reizbewegungen der Droseracee Aldrovanda vesiculosa gehen wir hier nicht ein. Sie ist viel weniger genau untersucht als Dionaea; was bekannt ist, gleicht den Verhältnissen von letzterer so sehr, daß dessen Beschreibung nur eine Wiederholung von Bekanntem sein würde. Da Aldrovanda eine Wasserpflanze ist, so ist ihre Beute natürlich eine andere, hauptsächlich kleine Krebse, Wasserinsekten, Rädertierchen usw.

2c) Reizbare Staubgefäße. Wir wenden uns nunmehr den seismonastisch reagierenden Staubgefäßen zu und berücksichtigen in erster Linie die der Cynareen, über die wir hauptsächlich durch die grundlegenden Untersuchungen Pfeffers unterrichtet sind. Wie bekannt, haben die Compositenblüten fünf Staubgefäße, deren Staubbeutel zu einer den Griffel umgebenden Röhre verwachsen sind, während die Filamente frei sind. Im ungereizten Zustande sind diese Filamente bei den Cynareen gerade (Juel). Auf Berührungs- bezw. Stoßreize hin verkürzen sie sich beträchtlich (bis 30 %). Diese Verkürzung, durch welche das Antherenrohr nach unten gezogen wird, gleicht sich alsbald wieder aus und die Filamente sind nun in Form eines Körbchens bogig nach außen gewölbt (Fig. 3A). Da die Antheren sich nach innen öffnen, so wird durch die Reizbewegung Pollen am Griffel abgestrichen. Durch das Vorhandensein von sogenannten Fegehaaren wird hier das Haftenbleiben größerer Pollenmassen ermöglicht.

In der Natur sind es die Insekten, die mit ihrem Rüssel in die Blüten eindringen, hierbei die Filamente streifen und deren Zusammenziehung veranlassen. Ein Teil des Pollens, der dabei herausgefegt wird, lädt sich auf dem Rüssel ab und kann von dem Insekt auf die Narbe einer anderen Blüte übertragen werden. Oekologisch ist also die Einrichtung als eine Anpassung an Insektenbestäubung zu betrachten.

Die Mechanik der Verkürzungsbewegung wird im Artikel „Bewegungen der Pflanzen" (Bd. I) behandelt. Es sei hier nur er-

[1]) Aehnliches wurde übrigens später auch bei Mimosa konstatiert (vgl. Bose).

wähnt, daß es sich um ganz dieselben Vorgänge handelt wie bei Mimosa, also um plötzliche Ausstoßung von Flüssigkeit aus den Zellen in die Interzellularen. Die in der Längsrichtung außerordentlich dehnbaren Membranen der Zellen sind durch den osmotischen Innendruck im ungereizten Zustand des

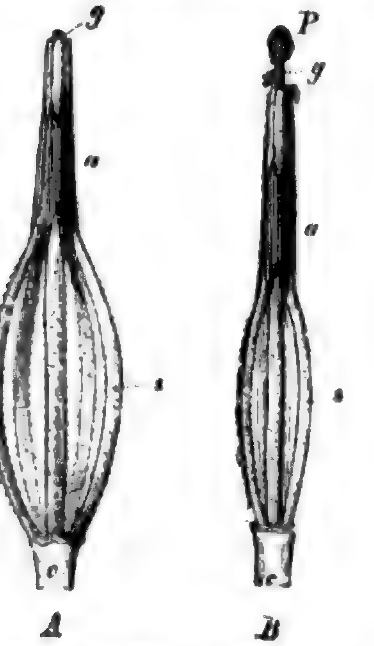


Fig. 3. Staubblätter der Centaurea jacea, durch Entfernen der Kronröhre freigelegt. A Im reizempfänglichen, B im kontrahierten Zustande. c Unterer Teil der Kronröhre, s Staubfäden, a Antherenröhre, g Griffel. P Pollen. Vergrößert. Aus Jost. Frei nach Pfeffer.

Staubfadens stark gespannt. Wird dieser Druck infolge der Reizung durch Wasseraustritt vermindert, so tritt mit der Entspannung eine beträchtliche Verkürzung ein.

In welcher Weise das Plasma durch Stoßreize affiziert wird, wissen wir hier ebensowenig wie bei Mimosa oder Dionaea; auch ist unbekannt, wodurch die Druckverminderung zustande kommt. Sicher ist nur, daß sie durch irgendeine Plasmatätigkeit hervorgerufen wird. Pfeffer hat nachgewiesen, daß Verminderung der Dehnbarkeit der Zellmembran, an die man ja bei der Erklärung der Erscheinung denken könnte, nicht stattfindet.

Vom Beginne der Reizung bis zum Beginne der Kontraktion vergehen bei Centaurea americana nach K. Linsbauers Beobachtungen nur Bruchteile einer Sekunde; die Kontraktion selbst dauert 7 bis 13 Sekunden, nach etwa einer Minute sind die Staubgefäße wieder in den ursprünglichen Zustand zurückgekehrt. Reizleitung von einem Staubgefäß nach dem anderen findet, wie schon Covolo (1775) richtig angegeben hat, nicht statt. Wenn daher nach Berührung eines einzigen sich sämtliche Filamente verkürzen, so beruht das darauf, daß der Zug, der durch die Kontraktion des gereizten auf die übrigen ausgeübt wird, auf diese als Reiz wirkt.

Schon in der noch nicht völlig geöffneten Blüte sind die Staubgefäße schwach reizbar; von da ab nimmt die Irritabilität zu und erreicht ihr Maximum, wenn die Antheren ihren Pollen zu entlassen beginnen. Dieser Parallelismus ist in ökologischer Beziehung bemerkenswert. Wenn der Griffel der (protandrischen) Blüte sich streckt, beginnen die Filamente zu welken; ihr Turgor sinkt, sie verkürzen sich und sterben alsbald ab.

Für die Staubfäden von Centaurea jacea (gemeine Flockenblume) haben L. und K. Linsbauer die Reizschwelle annähernd bestimmt, indem sie Platingewichte aus verschiedener Höhe auf die horizontal gelegte Staubblattröhre fallen ließen. Es zeigte sich, daß unter günstigen Bedingungen Stoßenergien wirksam waren, deren lebendige Kraft dem Wert $2{,}08 . 10^{-4}$ cm/g entsprach.

An der Außenfläche der Centaureastaubfäden finden sich Emergenzen in Gestalt von zweizelligen Haaren und Papillen. Diese hervorragenden Gebilde werden vom hinabgleitenden Insektenrüssel natürlich besonders leicht gestreift und verbogen, und dadurch wird eine Reizung um so sicherer ausgelöst. Haberlandt nimmt an, daß sie mit den übrigen Zellen die Eigenschaft der Perzeptionsfähigkeit mechanischer Reize teilen und bezeichnet sie — besonders wohl wegen ihrer exponierten Stellung und ihres eigenartigen Baues — als Sinnesorgane. Linsbauer hat in Versuchen mit verschiedenen Centaureaarten eine Empfindlichkeit der Haare nicht feststellen können und erblickt in ihnen nur Organe, die infolge von Verbiegungen einen Stoßreiz den benachbarten Gewebepartien übermitteln (Stimulatoren). Brunn gelangte nach Versuchen mit Centaurea macrocephala zur gleichen Ansicht.

Zahlreichen anderen Staubgefäßen kommt Stoßreizbarkeit zu. Als die bekanntesten Fälle seien erwähnt Berberis, deren Staubgefäße den Kronblättern anliegen und bei Berührung der dem Blütenzentrum zugekehrten Seite sich plötzlich nach der Narbe zu krümmen (s. Juel), ferner Cacteen wie Opuntia und Cereus, Mesembryanthemum, Helianthemum und andere Cistaceen, Sparmannia (Zimmerlinde; Familie der Tiliaceen) u. a. In den letztgenannten Fällen scheinen nicht rein nastische, sondern daneben tropistische Bewegungen vorzukommen. Eine ausführliche Zusammenstellung der Pflanzen mit reizbaren Staubgefäßen, über 150 Arten umfassend, hat Hansgirg (1890) gegeben.

2d) Reizbare Narben. Wir be-

schließen diesen Abschnitt mit einer kurzen Behandlung der reizbaren Narben. Sie kommen bei Angehörigen verschiedener Familien vor, vor allem bei Sympetalen aus der Ordnung der Personatae. Einige der bekanntesten Beispiele sind Mimulus (Scrophulariaceae), Torenia (desgl.), Martynia (Pedaliaceae), Incarvillea (Bignoniaceae), Goldfussia (Acanthaceae). Die Reizbarkeit dieser Narben ist schon seit Beginn des vorigen Jahrhunderts bekannt, doch beruhten unsere Kenntnisse von den sich abspielenden Prozessen und deren Ursachen bis vor kurzem größtenteils auf gelegentlichen Beobachtungen und Versuchen; eine eingehendere Untersuchung ist erst von Lutz durchgeführt worden. Wir greifen als Typus Mimulus heraus. Die Narbe besteht aus zwei, in der Medianebene der Blüte gelegenen Lappen, die in der Knospe aneinandergelegt sind. Nach dem Aufblühen klappen sie auseinander und bilden miteinander einen Winkel von 90° und darüber. Wird irgendwelcher Druck auf die Narbenlappen ausgeübt, der das Parenchymgewebe deformiert, so schließen sie sich plötzlich, ähnlich wie die beiden Hälften des Dionaeablattes; folgen keine neuen Reize, so setzt schon nach wenigen (5 bis 8) Minuten die Gegenreaktion ein, die etwa in einer Viertelstunde die Lappen in den ursprünglichen Divergenzwinkel zurückführt. Ob bei dieser rückläufigen Bewegung, wie z. B. bei Mimosa und Biophytum Oszillationen vorkommen, scheint nicht untersucht zu sein. Notwendig ist dieser Analogieschluß keineswegs, denn in anderer Beziehung weicht das Verhalten der Narben von dem der Sinnpflanze stark ab: so tritt z. B. bei dauernder Reizung die Gegenreaktion nicht ein, die Narbenlappen bleiben vielmehr geschlossen, sind also vergleichbar dem Muskel, der durch fortdauernde Induktionsschläge tetanisiert worden ist (über Tetanus vgl. den Artikel „Muskeln, allgemeine Physiologie der Muskeln"). Die Reaktion beruht auch hier auf plötzlicher Entspannung infolge Verringerung des Turgors. Das gesamte Volumen eines Narbenlappens wird nach der Reizung vermindert; Innen- und Außenseite verkürzen sich; das Schließen kommt dadurch zustande, daß die Verkürzung der ersteren doppelt so groß ist wie die der letzteren. Der Reiz kann bei Mimulus cardinalis, Martynia proboscidea u. a. von einem Narbenlappen zum anderen geleitet werden; bei anderen Mimulusarten ist das nicht möglich. Oliver hat gezeigt, daß diese Leitung auch noch nach Durchschneidung des dem gereizten Narbenlappen zukommenden Gefäßbündels stattfindet: das Parenchym kann also als Leitungsbahn fungieren. Vermutlich handelt es sich um die Uebertragung eines Erregungszustandes.

Lutz spricht der Reizbarkeit der Narben eine wesentliche ökologische Bedeutung ab. Kitchener sieht dagegen wohl mit Recht den Zweck der Einrichtung in der Verhinderung der Selbstbestäubung. Wenn eine Biene in die Blüte eindringt, so berührt sie zunächst die Narbe, die sich auf diesen Reiz hin schließt und nun der Gefahr entgeht, mit dem Pollen bestäubt zu werden, mit dem die Biene beim Verlassen der Blüte beladen ist. Die Tatsache, daß bei Mimulus luteus Selbstbestäubung zum Samenansatz führt, ist nicht ein Einwand, sondern eine Bestätigung dieser Deutung, denn Darwin hat gezeigt, daß die aus Kreuzbefruchtung hervorgegangenen Pflanzen in den ersten Generationen den selbstbefruchteten überlegen sind.[1]) Gerade darum aber, weil die Gefahr so nahe liegt, daß ein großer Teil der Samenanlagen infolge Selbstbestäubung der Fremdbefruchtung entzogen werden, müssen besondere Maßregeln im Interesse der Nachkommenschaft und der Erhaltung der Art ergriffen werden.

In diesem Zusammenhang wollen wir anhangsweise noch eines weiteren Falles von Stoßreizbarkeit gedenken, der ebenfalls als Anpassung an Fremdbestäubung durch Insekten zu deuten ist. Er findet sich bei der Orchidee Masdevallia muscosa. Die Lippe der Blüte besteht hier der Länge nach aus zwei Teilen, die durch ein Gelenk getrennt sind. Der vordere Abschnitt dieser Lippe ist nach vorn stark verbreitert und hat oberseits einen Haarkamm. Nach Berührung dieses letzteren (etwa durch ein auffliegendes Insekt) klappt dieser Lippenteil nach oben und das Insekt wird nun infolge entsprechender Anordnung der übrigen Blütenteile (Kelch- und Kronblätter, Säulchen) in einem Hohlraum eingeschlossen, der ihm nur an einer Stelle das Entweichen gestattet, dort nämlich, wo die Pollenmassen der Anthere liegen. Mit diesen beladen verläßt das Insekt dann die Blüte, um sie einer anderen zuzuführen. Reizphysiologisch ist dieser Fall deshalb interessant, weil nach Olivers Angaben die Perzeptionsfähigkeit des Stoßreizes nur dem auf der Oberseite des Labellums befindlichen Kamm zukommt. Es ist das also einer der wenigen Fälle im Pflanzenreich, in denen eine strenge Trennung von Perzeptions- und Reaktionszone durchgeführt ist.

3. Haptonastie. Bei der Behandlung der Fälle, in denen Kontaktreize[2]) durch

[1]) Da Darwins Versuche offenbar nicht von ganz reinem Samenmaterial ausgegangen sind, wäre es allerdings wünschenswert, sie unter Vermeidung dieser Fehlerquelle zu wiederholen.

[2]) Ueber die Definition von Kontakt- oder Tastreiz und den Unterschied zwischen Kontakt- und Stoßreizbarkeit vgl. S. 255.

eine nastische Reaktion beantwortet werden, können wir uns kurz fassen. Es gehören hierhin z. B. gewisse Ranken, ferner die Tentakeln von Drosera. In beiden Fällen handelt es sich zum Teil um äußerlich radiäre Organe (z. B. Ranken von Vitis), die aber durch ihre Reaktionsweise eine physiologische Dorsiventralität verraten. Die Ranken sind im vorletzten Teile dieses Artikels (Tropismen) so ausführlich behandelt worden, daß es überflüssig erscheint, hier nochmals näher darauf zurückzukommen. Wir sehen von den allseits haptotropisch empfindlichen Ranken, die auf Kontaktreiz rein tropistisch reagieren, hier ab und betrachten nur kurz die sogenannten einseitig haptotropisch empfindlichen Ranken, wie sie z. B. bei vielen Cucurbitaceen vorkommen. Sie haben, wie wir wissen, die Eigenschaft, nur nach einer vom Organ vorgeschriebenen Seite reagieren zu können. Wir wollen die Seite, die sich konvex krümmt, die dorsale nennen. Wirkt auf sie ein Kontaktreiz, so erfolgt keine Reaktion; doch wird dieser Reiz perzipiert, und sein Einfluß äußert sich darin, daß er eine von der anderen Seite ausgeübte Reizung paralysiert. In bezug auf das Perzeptionsvermögen von Tastreizen sind also diese Ranken physiologisch radiäre, in bezug auf das Reaktionsvermögen dagegen dorsiventrale Organe. Wir können die auf einen Reiz hin erfolgende Krümmung als Tropismus ansehen, weil sie immer nach der Angriffsseite des Reizes hin erfolgt; als Nastie andererseits kann sie deshalb aufgefaßt werden, weil die Krümmung durch die dorsiventrale Beschaffenheit des Organs (die sich im einseitigen Reaktionsvermögen ausspricht) gelenkt wird. Es liegt in der Natur der Sache, daß hier ein Kriterium, das für die meisten Tropismen zutrifft, wegfällt: der Reiz ist kein eigentlich gerichteter und deshalb kann das Organ auch nach der Reaktion in bezug auf die Richtung des Reizes keine bestimmte Ruhelage einnehmen. Dadurch verwischen sich die Begriffe etwas. Daß auf diffusen (allseitig gleichstarken) Reiz keine Reaktion erfolgt, ist kein Gegengrund, von Nastie zu reden, denn die nastische Reaktion braucht ja nicht von der Verteilung des Perzeptionsvermögens abzuhängen; andererseits kann man hier auch nicht sagen, es sei gleichgültig, von welcher Seite der Reiz angreift, die Reaktion erfolge immer in einer Richtung, denn es ist ja nur eine Seite haptotropisch empfindlich. Wir sehen, es würde in einen müßigen Wortstreit ausarten, wollten wir diesen Betrachtungen noch weiter nachgehen. Alles läßt sich eben nicht in das Schema scharf begrenzter Definitionen zwängen. Gerade die Uebergänge sind ja das, was uns zur Einheitlichkeit der Naturauffassung verhilft, und darum muß die Beschreibung und Erforschung der Tatsachen und deren Beziehungen zueinander immer wichtiger bleiben als deren Sonderung in getrennte, künstlich geschaffene Gruppen.

Etwas einfacher in dieser Hinsicht liegen die Dinge beim Sonnentau (Drosera). Wir berücksichtigen hier nur die bei uns häufigste Art Drosera rotundifolia, an der auch die meisten Untersuchungen ausgeführt worden sind; ohne Zweifel verhalten sich die anderen Arten ebenso. Drosera ist bekanntlich eine insektenfressende Pflanze (vgl. den Artikel „Insektenfressende Pflanzen"), deren Blätter oberseits und am Rande eigenartige Emergenzen, die sogenannten Tentakeln tragen. Werden die Randtentakeln berührt, so krümmen sie sich infolge stärkeren Wachstums der peripheren Seite nach der Mitte, und es ist dabei offenbar gleichgültig, von welcher Seite der Berührungsreiz ausgeübt wird. Wie geringe Reize genügen, das beweist ein Versuch Darwins, der durch Auflegen eines Stückes menschlichen Haares von 0.000822 mg Gewicht Reaktion auslösen konnte. Empfindlich für direkte Kontaktreizung ist nur das Köpfchen des Tentakels. Wird ein anfliegendes Insekt hier von dem klebrigen Sekret festgehalten, so kann es durch die Reizbewegung des Tentakels nach der Blattmitte befördert werden. Die Berührung der zentralen Tentakeln löst dann indirekt eine Krümmung der übrigen peripheren nach der Mitte zu aus, in diesem Falle sprechen wir von indirekter Reizung der letzteren. Bei den Reaktionen, die auf solche indirekte Reizungen hin erfolgen, kann nun die Richtung, aus der der Reiz zugeleitet wird, die Krümmungsrichtung bestimmen. Das sehen wir deutlich, wenn die Flächententakeln an zwei exzentrischen Punkten der Blattfläche gereizt werden; dann krümmen sich die Randtentakeln nach diesen beiden Punkten zu; hier überwiegt also ein tropistischer Impuls den nastischen oder schließt ihn vielleicht völlig aus. Da hierüber und über die weiteren Fälle, in denen möglicherweise Haptonastie vorkommt, keine eingehenderen Untersuchungen vorliegen, müssen wir uns mit diesen wenigen Bemerkungen begnügen. Geteilt sind die Ansichten auch noch über die Bahnen der Reizleitung in den Droseratentakeln.

4. Chemonastie. Wir kennen verschiedene Fälle, in denen auf stoffliche Reizungen hin, also auf solche, die von der chemischen Qualität, nicht Quantität (Konzentration) gewisser Körper ausgehen, nastische Krümmungsbewegungen erfolgen. Im Abschnitt 2 sind beiläufig schon Beispiele dieser Art erwähnt worden. Man rechnet hierhin die auf chemische Reizung erfolgenden

Bewegungen des Blattes von Dionaea, Pinguicula, der Tentakeln von Drosera, epinastische Krümmungen anderer Blätter (z. B. Callisia) und von Ranken. Freilich ist nicht in allen diesen Fällen der nastische Charakter der betreffenden Erscheinungen streng erwiesen, doch wollen wir diese Frage erst einmal beiseite lassen und uns den Vorgängen selbst zuwenden.

Wir beginnen mit Dionaea muscipula. Auch hier hat Darwin die grundlegenden Tatsachen ermittelt. Legt man auf ein Dionaeablatt vorsichtig (unter Vermeidung von Stoßreizen) ein Stückchen Fleisch oder Hühnereiweiß, so beginnen die beiden Hälften sich gegeneinander zu bewegen und schließen nach einiger Zeit den Körper fest ein. Voraussetzung ist allerdings, daß die Substanzen feucht sind. Völlig trockenes Fleisch löst z. B. keine Reaktion aus. Nur gelöste (oder gasförmige) Körper wirken also als chemischer Reiz, und das ist leicht verständlich, denn damit sie das Plasma affizieren können, müssen sie bis zu diesem vordringen und also die Zellwand passieren. Die Blattfläche ist aber an und für sich trocken, es findet Ausscheidung von Flüssigkeit erst statt, wenn ein chemischer Reiz perzipiert worden ist. Dann sondern die zahllosen auf der Innenfläche befindlichen Drüsen ein sauer reagierendes Sekret ab, welches die Lösung (Verdauung) des Eiweißes befördert (vgl. den Artikel „Insektenfressende Pflanzen").

Was die Natur des Reizes anlangt, so muß hervorgehoben werden, daß in Darwins Versuchen nur stickstoffhaltige Körper chemonastische Bewegungen auszulösen imstande waren. Allerdings hat Darwin nur verhältnismäßig wenig Stoffe untersucht; es wäre möglich, daß auch Phosphor und andere Stoffe als Reize wirken. Bei eingehenderer Prüfung wird sich dann vielleicht ergeben, daß verschiedene Körper getrennt perzipiert werden und das chemonastische Perzeptionsvermögen ähnlich wie das chemotaktische (s. S. 222) nicht ein einheitlicher, sondern ein Sammelbegriff ist. Nach der Reizung tritt im Zellsaft der Drüsenzellen eine eigenartige Zusammenballung (Aggregation) ein, die wir hier aber nicht näher besprechen wollen, weil sie höchstwahrscheinlich mit den Vorgängen, die die chemonastische Krümmungsbewegung einleiten, in keinerlei direktem Zusammenhang steht. Immerhin ist die Erscheinung deshalb bemerkenswert, weil sie uns ein Kennzeichen dafür abgibt, daß irgend ein Reiz perzipiert worden ist.

Die chemonastischen Vorgänge unterscheiden sich von den bei der gleichen Pflanze beobachteten seismonastischen in mehreren Punkten bedeutend. Zwar findet in beiden Fällen eine gegenseitige Annäherung der Blattlappen bis zur Schließung statt; während diese aber nach Stoßreiz fast momentan erfolgt, setzt sie nach ausschließlich chemischer Reizung sehr langsam ein, und es bedarf mehrerer Stunden, bis die Schließung erreicht ist. Ist das geschehen, dann bleibt das Blatt lange (mehrere Tage bis Wochen) geschlossen, bis der Inhaltskörper (Stück Fleisch, Insekt) verdaut ist. Würde man einige Zeit nach der Schließung den Inhaltskörper entfernen und die bereits gelösten Stoffe wegspülen, so würde aller Wahrscheinlichkeit nach die Oeffnung früher erfolgen. Es ist also wohl die fortdauernde Reizung, die das Blatt geschlossen hält, und damit hätten wir eine Erscheinung vor uns, die dem Tetanus des Muskels entspricht (s. o. S. 296 und die Angaben bei Macfarlane S. 397). Häufig sind die Blätter nach Verdauung eines größeren Insekts so erschöpft, daß sie sich überhaupt nicht wieder öffnen, welken und absterben. Doch ist schon öfter beobachtet worden, daß Blätter zwei bis drei Fliegen nacheinander verdaut haben (Angaben von Mrs. Treat, zitiert bei Darwin „Insektenfressende Pflanzen", S. 281), mehr aber wohl selten. Durch Stoßreize kann man die Blätter unvergleichlich viel häufiger zum Schließen und Wiederöffnen veranlassen.

Auch die Reizleitungs- und Reaktionsvorgänge sind nach chemischer Reizung in mancher Beziehung andere als nach mechanischer. So kann man beobachten, daß nach Auflegen kleiner Eiweißwürfel das Blatt sich zunächst an der Stelle krümmt, wo der Reizstoff liegt, während wir nach Stoßreiz eine momentane Ausbreitung der Erregung über das ganze Blatt annehmen müssen. Ist ein Insekt eingeschlossen, so bewirkt der chemische Reiz fernerhin, daß die Blatthälften sich mit außerordentlicher Kraft an dasselbe anpressen und es gleichsam zu zerdrücken suchen. Der ursprüngliche Hohlraum, eine Folge der Konkavität beider Lappen, wird also möglichst verringert.

Alle diese Erscheinungen sind allerdings noch nicht geeignet, eine qualitative Verschiedenheit zwischen chemo- und seismonastischen Reizvorgängen des Dionaeablattes exakt zu begründen, wenngleich sie diese Annahme nahe legen. Ausschlaggebend in dieser Hinsicht ist eine Beobachtung Darwins, dahingehend, daß Blätter, die aus irgendwelchen Gründen gegen mechanische Reize unempfindlich waren, sich in einem Tage dicht schlossen, als zerdrückte Insekten auf die Innenseite gelegt wurden. Wenn Seismo- und Chemonastie wesensgleich wären, so müßten sie natürlich auch durch die gleichen Bedingungen ausgeschaltet

werden. Zukünftige Untersuchungen werden zu zeigen haben, ob es möglich ist, unterschwellige chemische und mechanische Reize zu summieren; das kann nur dann der Fall sein, wenn sie als gleichartige perzipiert werden.

Die beiden anderen chemonastisch empfindlichen Insektivoren, die oben erwähnt wurden, Drosera und Pinguicula, reagieren ebenfalls auf Stickstoffverbindungen. Ein kleiner Tropfen einer Ammoniumnitratlösung, der 0,0025 mg dieses Salzes enthielt, verursachte in Darwins Versuchen die Krümmung eines Randtentakels von Drosera rotundifolia nach der Mitte, wenn er auf das Köpfchen gebracht wurde. Die verschiedensten anorganischen und organischen Verbindungen sind starke Reizmittel, namentlich die des Stickstoffs und Phosphors, aber auch andere, wie z. B. Natronsalze, giftige Schwermetallsalze, wie Quecksilber-, Kupfer-, Gold-, Platinchlorid, verdünnte Säuren usw. Im allgemeinen sind in Elektrolyten die Kationen wirksamer als die Anionen, doch sind die Droseratentakeln bei weitem nicht für alle Kationen empfindlich; es ergeben sich da vielmehr interessante Unterschiede, wie z. B. die Reizbarkeit durch Natriumsalze und die Indifferenz gegenüber den entsprechenden Kaliumsalzen, eine auf den ersten Blick merkwürdige Erscheinung, denn man sollte eher annehmen, daß die Tentakeln auf Kalium reagieren, das die Pflanze im Stoffwechsel braucht, während Natrium kein notwendiger Nährstoff ist. Gewiß spielen aber diese Reaktionen auf Salze ökologisch keine sehr wichtige Rolle; alles ist, wenn man so sagen darf, auf den Insektenfang und die Insektenverdauung zugeschnitten, und da kommt vor allem die Reaktion auf organische Stickstoffverbindungen in Betracht. Es wäre möglich, daß gerade die Insekten reicher an Natrium sind, und dieses somit bei der Erreichung des erstrebten Zieles behilflich wäre.

Was die direkte und indirekte Reizung, die Reizleitung und die Trennung von Perzeptions- und Reaktionszone anlangt, so liegen hier die Verhältnisse ähnlich wie bei der oben besprochenen Haptonastie. Nach Reizung des Tentakelköpfchens treten sehr ausgesprochene Aggregationen in den Zellen auf, die sich vom Ende des Tentakels nach der Basis fortpflanzen.

Der Unterschied in der Reaktionszeit und Reaktionsgeschwindigkeit nach mechanischer und chemischer Reizung ist bei Drosera lange nicht so ausgesprochen wie bei Dionaea. Eine geringere Geschwindigkeit der chemonastischen Krümmung läßt sich im allgemeinen nicht konstatieren; intensive chemische Reize wirken sogar stark beschleunigend. Irgendwelche sicheren Anhaltspunkte, ob die chemonastische Sensibilität bei Drosera von der haptonastischen wesensverschieden ist, besitzen wir leider noch nicht.

Die Blätter des ebenfalls insektivoren Fettkrauts (Pinguicula) reagieren durch teilweises Einrollen ihrer Spreite nach oben. Kleine Gegenstände, welche in die Nähe des Blattrandes gelegt werden, können so umklammert werden. Es scheinen nur stickstoffhaltige Verbindungen als chemischer Reiz zu wirken. Die Einrollung, die vermutlich auf beschleunigtem Wachstum der unterseitigen Randpartien beruht, erfolgt nur ziemlich langsam und geht stets wieder zurück, auch wenn der chemische Reiz fortwirkt. Das erinnert an das Verhalten von Mimosa bei schnell aufeinanderfolgenden Stoßreizen.

Nebenbei sei bemerkt, daß die Bewegung auch auf mechanische Wirkung (Druck) chemisch indifferenter Körper, wie Glassplitter, hin eintritt. Es ist möglich, daß es sich dabei um Haptonastie handelt.

Interessante Beobachtungen hat Correns über die chemische Reizbarkeit der Ranken gemacht. Vorsichtiges Umspülen mit Jodwasser, verdünnter Essigsäure, verdünntem Chloroformwasser veranlaßt Einkrümmung genau so wie nach haptotropischem Reiz. Die Richtung dieser Reaktion ist immer dieselbe, wird also durch die dorsiventrale Struktur der Ranke bestimmt. Merkwürdigerweise reagierten auf die diffusen Reize auch solche Ranken (wenngleich schwächer), die morphologisch radiär sind und auch gegenüber dem haptotropischen Reiz als allseits gleich empfindlich gelten. Es muß noch dahingestellt bleiben, ob hier eine ganz besondere Reizbarkeit vorliegt oder ob vielleicht bei allen Ranken die Empfindlichkeit im Umkreis mehr oder weniger ungleich verteilt ist und man dies bei Kontaktreizung bisher nur übersehen hat.

Während in den bisher in diesem Abschnitt besprochenen Beispielen neben der chemonastischen Empfindlichkeit eine solche gegenüber mechanischen (Stoß- oder Tast-) Reizen vorhanden ist, sind bei den Blättern der Commelinacee Callisia repens diese beiden Eigenschaften nicht liiert. In der Kultur im gut durchlüfteten Warmhaus bilden diese Blätter mit dem Stengel etwa einen rechten Winkel. Bringt man eine Pflanze ins Laboratorium, so beobachtet man eine dorsalkonvexe Krümmung, die in wenigen Tagen so weit vorgeschritten ist, daß die Blätter dem Stengel völlig anliegen. Dies beruht, wie Wächter gefunden hat, darauf, daß Verunreinigungen der Luft auf die Blätter einen Krümmungsreiz ausüben. Das

schwer definierbare, Laboratoriumsluft genannte Gasgemisch übt, wie wir jetzt wissen, mannigfache physiologische Wirkungen aus, die bei manchen Untersuchungen sehr störend sind. Hauptsächlich sind es wohl Spuren von Leuchtgas, die hier in Betracht kommen, und es zeigte sich auch, daß die Callisiablätter sich einkrümmten, wenn sie im Warmhaus unter Glasglocken in eine verdünnte Leuchtgasatmosphäre gebracht wurden. Aehnlich wirken Dämpfe von Aether, Formamid, Acetonitril, Zigarettenrauch; Kampfer brachte keinen Erfolg.

Ueber die Verbreitung der Reaktion wissen wir noch nichts Näheres. Gelegentliche Beobachtungen überzeugten mich, daß sie bei einer ganzen Reihe von Blättern, wenn auch in geringerem Maße, vorkommt.

Man sieht die Reaktion nach Wächters Vorgang allgemein als eine chemonastische an; sie wurde deshalb auch in diesem Kapitel behandelt — doch soll nicht unterlassen werden, darauf hinzuweisen, daß der strenge Beweis dafür eigentlich noch nicht geliefert worden ist. Nicht sowohl dafür, daß es chemische Wirkungen sind, die die Reizbewegung auslösen — denn darüber kann kein Zweifel bestehen —, als vielmehr dafür, daß eine wirkliche Nastie vorliegt. Dorsiventrale Organe können ja auch tropistisch reagieren und wenn bei einem Blatt Ober- und Unterseite gegenüber ein und demselben Reiz verschieden empfindlich sind (ihn beispielsweise verschieden stark perzipieren), so kann der Fall eintreten, daß bei gleichstarker Wirkung des Reizes auf beide Seiten sich das Organ in derselben Richtung krümmt, wie wenn es nur einseitig gereizt worden wäre. Die Bewegung könnte mit einer rein tropistischen Reaktion identisch sein. Wir ersehen daraus, daß wir über die Natur einer Krümmung bei einem dorsiventralen Organ noch nichts Bestimmtes aussagen können, wenn wir ausschließlich sein Verhalten bei diffuser Reizung kennen; um sie als nastische nachzuweisen, muß immer erst die Unabhängigkeit der Krümmungsrichtung von der Angriffsrichtung des Reizes festgestellt sein.

5. Thermo- und Photonastie. Das Auftreten von Krümmungsbewegungen als Folge von Temperaturveränderung ist bei einer großen Anzahl physiologisch dorsiventraler Organe bekannt. Wir wollen uns zunächst an einige der Objekte halten, die uns bereits aus den vorigen Kapiteln bekannt sind. Viele von ihnen reagieren auf Wärmeschwankungen, so die Tentakeln von Drosera, mit denen bereits Darwin eine Reihe Versuche gemacht hat, die neuerdings von Benecke bestätigt und erweitert worden sind. Es bedarf ziemlich hoher Temperaturen, um die Bewegung auszulösen; 35° war in Beneckes Versuchen das Minimum, 53° das Maximum. Wurde ein Blatt in Wasser von 46 bis 47° versenkt, so begannen die Tentakeln etwa nach einer halben Stunde sich zu krümmen. In Zimmertemperatur werden die Krümmungen wieder ausgeglichen. Daß es nicht das Wasser als solches ist, welches die Reaktion hervorruft, beweisen Kontrollversuche in erwärmter Luft.

Auch beim Dionaeablatt sind thermonastische Krümmungen nachgewiesen worden (Macfarlane; Brown und Sharp). Ranken der verschiedensten Pflanzen reagieren in ganz ähnlicher Weise thermonastisch, sowohl auf Temperaturerhöhung wie auf Abkühlung. Wie Correns gezeigt hat, muß die Temperaturdifferenz in einer bestimmten nicht zu langen Zeit erreicht werden, damit Reaktion eintritt. Das erinnert an die Reizung der Mimosa, bei der ebenfalls ein sich langsam steigernder Reiz wirkungslos ist. Ebenso wie auf chemischen Reiz hin reagierten in Correns Versuchen alle Ranken, auch die haptotropisch als radiär angesehenen. Der Nachweis, daß tatsächlich reine Nastie vorliegt, ist dadurch erbracht worden, daß die Wärme von beliebigen Seiten zugeführt werden kann, ohne daß sich die Krümmungsrichtung der Ranke ändert.

5a) Schlafbewegungen. Die meisten Fälle thermo- und photonastischer Reaktionen sind unter dem Namen Schlafbewegungen bekannt. Man nennt diese auch nyktinastische (früher nyktitropische) Bewegungen. Aus verschiedenen Gründen läßt sich eine streng getrennte Behandlung von Temperatur- und Lichtwirkungen nicht wohl durchführen. Einmal ist in vielen Fällen noch nicht sicher entschieden, welche Effekte auf Kosten des Lichts, welche auf Kosten der Temperatur zu setzen sind; da wo diese Trennung möglich ist, ergeben sich aber im allgemeinen so ähnliche Bilder, daß die gesonderte Behandlung zu vielen Wiederholungen führen würde. Schließlich mag erwähnt sein, daß in der Natur wohl nie die Wirkung eines dieser Faktoren rein zum Ausdruck kommt, vielmehr dürften Temperatur und Licht meist gleichsinnige Reaktionen hervorbringen, die sich vermutlich im Pflanzenorgan übereinanderlagern.

Wer einmal aufmerksam Blüten und Blätter zu verschiedenen Tageszeiten beobachtet hat, dem kann es nicht entgangen sein, daß die Pflanzenwelt in den Vormittagsstunden ein wesentlich anderes Bild zeigt als gegen Abend, nach hereingebrochener Dämmerung. Viele Blätter, die tagsüber ihre horizontale Fläche dem Lichte darbieten, scheinen abends zu erschlaffen und sich müde herabzusenken, Blüten, die zum Empfang der Insekten weit geöffnet sind, schließen sich über Nacht oder neigen sich

zu Boden. Es ist wohl verständlich, daß diese äußerliche Aehnlichkeit mit Ermüdungszuständen Linné die Veranlassung gab, den Ausdruck Pflanzenschlaf hierfür zu prägen. Daher rühren auch die jetzt noch gebräuchlichen Bezeichnungen Schlafbewegungen und Schlafstellung (für die nächtliche Lage der Blätter. Durch sehr einfache Beobachtungen kann man sich allerdings leicht überzeugen, daß die Erscheinungen mit dem Schlaf der Tiere herzlich wenig zu tun haben. Sie beruhen keineswegs auf Ermüdungszuständen, und es besteht durchaus keine einfache Beziehung zwischen funktioneller Inanspruchnahme eines Blattes und Einleiten der nyktinastischen Reaktion. Vielmehr sind es aktive Bewegungen, die unter Aufwand von Energie stattfinden und bei ihrer Ausführung sogar ganz erhebliche entgegenstehende Kräfte überwinden können (Schilling 1895; Pfeffer 1911).

a) Schlafbewegungen der Laubblätter. Wir wollen zuerst die Schlafbewegungen der Laubblätter betrachten und wählen als Beispiel das bei uns häufige kleine Springkraut (Impatiens parviflora). Am frühen Morgen, schon vor Sonnenaufgang, befinden sich die Blätter in Tagstellung, sind also etwa horizontal gerichtet. Sie verharren in dieser Lage während des ganzen Tages; bei beginnender Dunkelheit tritt dann ziemlich schnell eine Senkbewegung ein, die in den ersten Nachtstunden so weit fortschreiten kann, daß die Blätter mit ihrer Spitze an den Stengel anschlagen. Einige Zeit bleibt diese Stellung fast unverändert, dann setzt (etwa um Mitternacht) die entgegengesetzte Bewegung ein, die das Blatt bis zum nächsten Morgen aus der Schlafstellung zur Tagstellung zurückführt. Schaltet man im Experiment das Oberlicht mehr oder weniger aus, so sieht man, daß die Senkbewegung des Blattes schon am frühen Morgen beginnt und tagsüber langsam fortschreitet. In der Natur wirkt dem der Transversalheliotropismus entgegen. Die Krümmungsbewegungen des Blattes kommen durch ungleichstarkes Wachstum von Ober- und Unterseite zustande. Ueberwiegt es auf ersterer, so muß sich das Blatt senken; das geschieht also bei Impatiens in der Natur gegen Abend. Es gibt nun aber auch Blätter, die sich gerade umgekehrt verhalten, deren Nachtstellung infolge stärkeren Wachstums der Unterseite eine aufgerichtete Lage ist. Zu diesen gehören z. B. Brassica, Linum, Stellaria.

Wie in dem Artikel „Bewegungen der Pflanzen" (Bd. I) ausgeführt wird, gibt es ferner eine große Reihe von Blättern, bei deren Schlafbewegungen Wachstum keine oder höchstens in der Jugend eine Rolle spielt. Das sind die mit Gelenk versehenen Blätter der Leguminosen und vieler Oxalidaceen. Auch der Wasserfarn Marsilea gehört hierher, ferner Marantaceen, einige Euphorbiaceen, Zygophyllaceen usw. Derartige durch Turgoränderungen zustande kommende Bewegungen nennt man bekanntlich zum Unterschied von den durch Wachstum erzeugten, den Nutationsbewegungen, Variationsbewegungen. Es ist hervorzuheben, daß die Mechanik der Schlafbewegungen eine andere ist als die der uns bereits bekannten, äußerlich in mancher Beziehung ähnlichen seismonastischen Reaktionen.

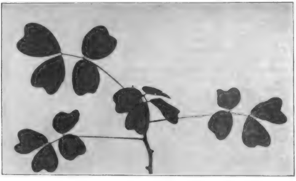
Auch bei den mit Gelenk ausgestatteten Blättern gibt es solche, die sich nachts senken und solche, die sich aufrichten. Bei zusammengesetzten, z. B. gefiederten Blättern können beide Bewegungsrichtungen an ein- und demselben Blatt gleichzeitig vorkommen. Das ist bei Mimosa der Fall; hier heben sich abends die Blättchen, das gesamte Blatt senkt sich dagegen im Gelenk des Hauptblattstiels;[1]) außerdem bewegen sich die Sekundärstiele, die die Blättchen tragen, in der Transversalebene (Paranastie). Durch Aufrichtung der Blättchen beim Einrücken in die Schlafstellung zeichnen sich noch verschiedene andere Gelenkpflanzen aus, namentlich Leguminosen, so z. B. Albizzia und Acacia, Neptunia, Smithia, Hippocrepis, Astragalus, Medicago, Lotus, Cytisus. Dagegen senken sich die Blättchen bezw. Blätter bei folgenden Pflanzen: Robinia, Glycyrrhiza, Wistaria, Phaseolus, Desmodium, Oxalis, Biophytum, Averrhoa u. a. (vgl. Hansgirg 1893). Zur letzteren Gruppe gehört auch die in den Figuren 4a und b abgebildete Amicia Zygomeris. Figur 4a zeigt einen Zweig der Pflanze mit ausgebreiteten Blättern, vormittags 11 Uhr; abends 6 Uhr (an einem trüben Tage) hatten sich die Blättchen wie in Figur b senkrecht nach unten gekrümmt und berührten sich mit ihren Unterseiten.

Im allgemeinen sind nach unten gerichtete Schlafbewegungen häufiger als Krümmungen nach oben. Die aufmerksame Beobachtung lehrt, daß die nyktinastischen Bewegungen sehr verbreitet sind, bei vielen Pflanzen sind sie allerdings ziemlich schwach und nur bei relativ wenigen so ausgesprochen wie etwa bei Amicia, Zygomeris, Albizzia lophantha, Mimosa pudica, Oxalis acetosella oder Impatiens noli tangere. Viele Pflanzen, so die meisten Coniferen und viele Monocotylen entbehren der Schlafbewegungen völlig; irgendeine Beziehung zwischen syste-

[1]) Auf die Ursache dieser Senkung kann hier nicht näher eingegangen werden. Man vgl. darüber Pfeffer, 1875, S. 73, 1907, S. 378, Schwendener (1897), Jost (1908).

matischer Stellung der Pflanzen und Vorhandensein von Nyktinastie besteht nicht, das zeigt schon das sehr ähnliche Verhalten von Marsilea und einigen Papilionaceen,

a



b

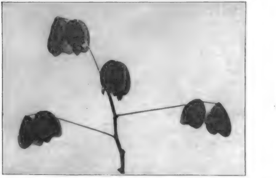


Fig. 4. Zweig von Amicia Zygomeris, $^4/_5$ nat. Gr. a Blättchen in Tagstellung, b in Schlafstellung.

ferner der Umstand, daß es Gattungen gibt, von denen einige Arten Schlafbewegungen ausführen, andere nicht.

Die auffallendste Eigenschaft der Schlafbewegungen ist, daß sie periodische sind, d. h. sie verlaufen in einem bestimmten Rhythmus, der dem Tag- und Nachtwechsel entspricht. Lassen wir ein Blatt seine Bewegung durch geeignete Uebertragung auf einer rotierenden Trommel als Kurve aufzeichnen, so wiederholt diese Kurve ihren Gang alle 24 Stunden in gleicher Weise, und innerhalb dieser Zeit weist sie ein Maximum und ein Minimum auf. Es lag daher sehr nahe, daran zu denken, daß diejenigen Außenfaktoren, welche sich mit dem Tag- und Nachtwechsel ändern, die Ursache der Schlafbewegungen sind. Drei kommen da hauptsächlich in Betracht: Licht, Temperatur und Feuchtigkeit, und alle drei sind tatsächlich von verschiedenen Forschern zur Erklärung herangezogen worden. Wenn derartige Erklärungsversuche im einzelnen auch weit voneinander abweichen, so stimmen sie doch darin überein, daß sie in den Schlafbewegungen paratonische (aitiogene), d. h. durch Veränderung der Außenumstände hervorgebrachte Reaktionen sehen.

Schon bald nachdem man begonnen hatte, die Frage experimentell in Angriff zu nehmen, stellte sich jedoch heraus, daß die Beziehungen zu den Außenfaktoren mindestens keine so ganz einfachen sein können. Man fand z. B., daß Blätter, die im Dunkeln gehalten werden, nicht eine unveränderte Dunkelstellung einnehmen, und daß Beleuchtungswechsel nicht zu allen Tageszeiten gleich wirkt. Derartige Beobachtungen ließen die Annahme aufkommen, daß die Schlafbewegungen auf eine innere, im Wesen der Pflanzen begründete (folglich auch erbliche) Periodizität zurückzuführen seien.

Daß diese Anschauung, die also die nyktinastischen Bewegungen als rein autonome betrachtet, unhaltbar ist, zeigte zuerst de Candolle. Er kehrte den Tagesrhythmus

um, indem er die Blätter nachts beleuchtete und tagsüber verdunkelte, mit dem Erfolge, daß dann auch die periodischen Bewegungen ihren Rhythmus um 12 Stunden verschoben. Diese, wenige Jahre später (1839) von Meyen bestätigten Versuche ließen allerdings noch zwei Erklärungsmöglichkeiten offen: ausschließliche Wirkung äußerer Faktoren oder das Vorhandensein einer erblichen Periodizität, die aber durch die Außenbedingungen verschoben, reguliert werden kann. Dieser letztere, vermittelnde Standpunkt fand späterhin viel Anklang. Man gründete sein Urteil allerdings mehr auf gelegentliche Beobachtungen und Experimente als auf wirklich exakte, planmäßige Untersuchungen. Solche hat erst Bert, vor allem aber Pfeffer (1875) durchgeführt. Bert hat einige Versuchspflanzen (Mimosa pudica) während 17 Tagen und Nächten in Abständen von 2 oder 3 Stunden beobachtet, hauptsächlich um zu konstatieren, in welcher Weise eine längere kontinuierliche Beleuchtung und Verdunkelung den Gang der Bewegungen des primären Blattstiels beeinflußt. In beiden Fällen ergab sich insofern Uebereinstimmung, als die Bewegungen keineswegs gleich zum Stillstand kommen, sondern die Periodizität geht zunächst annähernd in gleichem Rhythmus weiter. Die Exkursionen werden jedoch schon sehr bald geringer (in konstanter Dunkelheit schneller als im Dauerlicht) und schließlich klingen sie mehr und mehr aus. Daß die Pflanze dann keine dauernde Schädigung erlitten hat, geht daraus hervor, daß nach wiederkehrendem normalen Beleuchtungswechsel auch die periodischen Bewegungen in ihrer alten Amplitude wiederkehren.

Pfeffer hat diese Ergebnisse an anderen Objekten mit besseren Methoden bestätigt und wesentlich erweitert. Die Blätter von Albizzia lophantha und Impatiens noli tangere wurden in Pfeffers Versuchen unter den konstanten Bedingungen fast völlig bewegungslos, führten höchstens unregelmäßige, in maximo 5° bezw. 3° betragende Oscillationen aus. Bei anderen Blättern ist das Bild allerdings unter denselben Umständen ein äußerlich recht verschiedenes; die von Trifolium pratense, Desmodium gyrans (Hauptblatt!), Phaseolus vulgaris, Lourea vespertilionis stellen sich niemals in eine Ruhelage ein, sondern zeigen stets mehr oder weniger regelmäßige Schwankungen. Das sind jedoch Bewegungen, die, wie schon Sachs erkannt hat, mit der Tagesperiodizität nichts zu tun haben. Sie treten völlig unabhängig von den Schlafbewegungen auf (meist ist ihre Periode erheblich kürzer) und kommen bei deren Ausschaltung rein zur Geltung, während sie sich andernfalls mehr oder weniger mit ihnen kombinieren müssen. Besser als ausführliche Beschreibung zeigt die in Figur 5 reproduzierte Kurve diese Verhältnisse.

Die im Dauerlicht oder in Finsternis allmählich abklingenden periodischen Bewegungen, die den 12:12-stündigen Rhythmus meist ziemlich genau einhalten, werden Nachwirkungen (Nachschwingungen) genannt. Solche Nachschwingungen werden ohne Zweifel auch beim normalen Beleuchtungswechsel von Tag und Nacht induziert werden: sie können hier aber natürlich nicht rein in Erscheinung treten, weil die sich rhythmisch wiederholenden paratonischen Effekte, die eben der Beleuchtungswechsel hervorbringt, sich mit ihnen kombinieren.

In solchem Fall werden sich gleichphasige

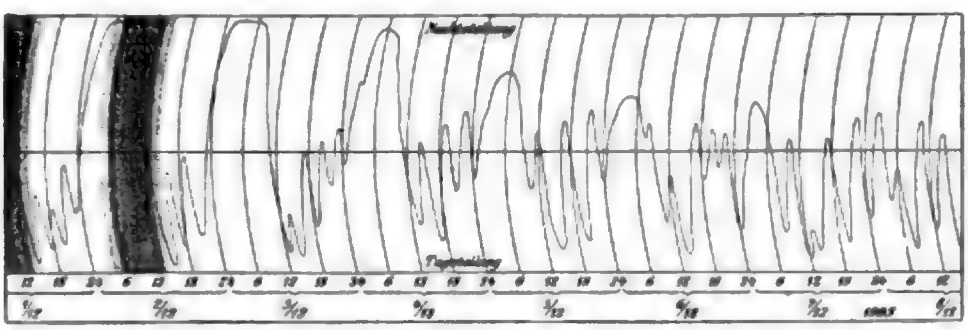


Fig. 5. Kurve der Bewegungen eines Primärblattes von Phaseolus vitellinus (Bohne). Auf der Abszisse sind die Stunden eingetragen; 18 bedeutet 6 Uhr abends, 24 Mitternacht. Darunter ist das jeweilige Datum verzeichnet. Die schwarz gehaltenen Partien bedeuten Dunkelheit. Das Blatt war vom 26. November bis 2. Dezember in einem tagesrhythmischen Beleuchtungswechsel gehalten worden, und zwar befand es sich jedesmal von 4½ Uhr morgens bis 1 Uhr mittags in voller Dunkelheit, während die Beleuchtung von 3 Uhr morgens allmählich ab-, von 1 bis 2½ Uhr mittags allmählich zunahm. Während der übrigen Zeit wurde das Blatt von 4 Tantallampen beleuchtet. Vom 2. Dezember ab wurde es dauernder Beleuchtung ausgesetzt. Die Kurve zeigt, daß die periodischen Bewegungen langsam an Größe abnehmen und schließlich ausklingen. Zuletzt sind nur noch kleine (autonome) Oszillationen vorhanden. Der höchste Punkt der Kurve bezeichnet die tiefste Lage des Blattes (Nachtstellung) und umgekehrt. Nach Pfeffer.

Bewegungen addieren, entgegengesetzt gerichtete subtrahieren. Beides ist, wie Pfeffer gezeigt hat, tatsächlich leicht zu erreichen. Schon der Umstand, daß Beleuchtung oder Verdunkelung, die an sich eine Hebungs- bezw. Senkungsbewegung induzieren, nicht jederzeit gleich wirken, sondern je nach der Bewegungsphase, in der das Blatt sich befindet einen verschieden starken Effekt hervorbringen, schon diese Tatsache zeigt das eigentlich. Pfeffer hat nun an Albizza lophantha beobachtet, daß einmalige Verdunkelung nicht eine einfache Senkbewegung des Hauptblattstiels zur Folge hat, sondern daß das Blatt sich darauf wieder hebt und sich diese Schwingung sogar mehrmals mit vermindertem Ausschlag wiederholen kann. Wir wollen von letzterem Punkt hier einmal absehen, weil es noch eine Streitfrage ist, ob solche Wiederholungen (Nachschwingungen) nach einmaligem Reiz allgemeiner vorkommen. Wurde nun eine Albizziapflanze um 8 Uhr vormittags verdunkelt, so trat zuerst eine Annäherung, dann wieder eine Entfernung (Ausbreitung) der Blättchen ein. Gegen Mittag schlug diese Bewegung zwar wieder in die entgegengesetzte um, doch wurde die eigentliche Nachtstellung, die im Zusammenlegen der Blättchen (oberhalb der Spindel) besteht, nicht erreicht, vielmehr näherten sich die Blättchen nur bis zu einem Winkel von 32°. Das kam eben daher, daß die auf Ausbreitung zielende Kraft (die Gegenreaktion der am Morgen induzierten Schließbewegung) der Schließung entgegenwirkte. Pfeffer gelangte so zu der Auffassung, daß die Schlafbewegungen der Blätter resultierende Bewegungen sind, die sich aus zwei Komponenten zusammensetzen: einmal den durch den täglichen Beleuchtungswechsel direkt induzierten paratonischen Krümmungen, zweitens den Nachschwingungen, die sich mit ihnen kombinieren.

In der Natur kommen außer den Veränderungen der Beleuchtung noch diejenigen der Temperatur in Betracht, auf die wir unten zu sprechen kommen werden. Im Experiment lassen sie sich ausschließen. Ob und inwieweit auch Feuchtigkeitsschwankungen mitsprechen, bedarf noch einer eingehenden Untersuchung. Man nimmt im allgemeinen an, daß sie keine in Betracht kommende Rolle spielen.

Als Ergebnis unserer bisherigen Betrachtungen wollen wir die Sätze festhalten: es ist möglich, die periodischen Bewegungen durch Konstanthalten der Außenbedingungen auszuschalten; bei erneutem Einsetzen des Tag- und Nachtwechsels treten sie wieder auf.

Für die Frage, ob die Außenbedingungen die Schlafbewegungen induzieren können, mußte es gewiß von Bedeutung sein, wenn sich zeigen ließe, daß ein durch kürzere oder längere als zwölfstündige Intervalle getrennter Beleuchtungswechsel den Rhythmus der Schlafbewegungen in entsprechender Weise verändert. Darauf ist Pfeffer in einer späteren Publikation (1907) näher eingegangen und hat auf Grund eines umfassenden Versuchsmaterials gezeigt, daß die Pflanzen sich in hohem Maße einem veränderten Beleuchtungsrhythmus anpassen können. Ein 6 stündiger Wechsel von Licht und Dunkelheit veranlaßt z. B. die Blättchen von Albizzia lophantha, im gleichen Turnus zu schwingen (vgl. Fig. 6); ihre hohe Reaktionsfähigkeit gestattet ihnen sogar, einem 1:1 stündigen Rhythmus zu folgen. Die Exkursionen der Blättchen sind in diesem Falle natürlich geringer, da ja der Geschwindigkeit der Bewegungen gewisse Grenzen gesetzt sind. Auch längere Perioden wie 18:18 oder 24:24 Stunden vermögen die Blättchen entsprechend zu beantworten. Allerdings sehen wir bei der Verdoppelung der Tagesperiode im Dunkeln bereits eine weitgehende Ausbreitung der Blättchen und sogar den Beginn einer Schließung (Nachschwingung), die aber durch die einsetzende Beleuchtung sofort überwunden wird. Unter den von Pfeffer untersuchten Objekten erwiesen sich die Fieder-

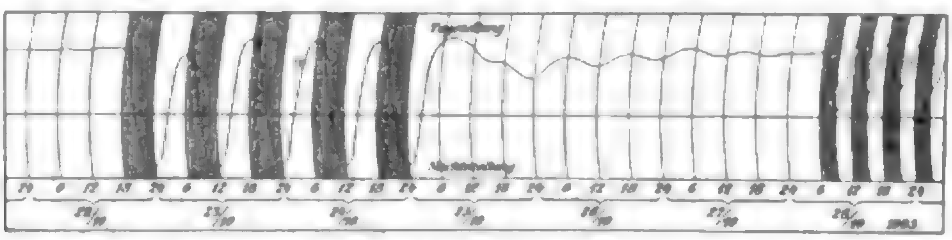


Fig. 6. Bewegung der Blättchen von Albizzia lophantha. Die Pflanze war längere Zeit im Dauerlicht gehalten worden, wobei die periodischen Bewegungen aufgehört hatten. Am 22. Oktober wurde im 6stündigen Rhythmus beleuchtet und verdunkelt. Die Blättchen passen sich, wie aus der Kurve hervorgeht, diesem Rhythmus in ihren Bewegungen an. Vom 25. Oktober ab ist wieder Dauerlicht, alsdann 3stündiger Beleuchtungswechsel, dem die Blättchen gleichfalls folgen. Vgl. im übrigen die Erklärung zu Figur 5. Nach Pfeffer.

blättchen von Mimosa Speggazzinii in ähnlicher Weise anpassungsfähig, weniger die Primärblätter von Phaseolus vulgaris, die aber auch z. B. eine 18-stündige Periodizität leicht annehmen. Wir werden auf diese Pflanze gleich zurückkommen.

Nach diesen Ergebnissen ist die Schlußfolgerung unabweisbar, daß eine rhythmische Veränderung der Außenbedingungen Schlafbewegungen induzieren kann. Die Existenz paratonischer (aitiogener) Schlafbewegungen ist also sichergestellt, und das Ausklingen derselben unter konstanten Bedingungen scheint zu beweisen, daß auch die Annahme eines erblichen tagesperiodischen Rhythmus endgültig widerlegt sei, denn es wäre sonst zu erwarten, daß dieser Rhythmus in Dauerbeleuchtung, die die Pflanze durchaus nicht schädigt, zum Ausdruck kommt. Das um so mehr, als nachgewiesenermaßen die Reaktionsfähigkeit der Blätter im Dauerlicht zum mindesten nicht nachhaltig geschädigt wird, denn sie setzen ja sofort wieder mit Schlafbewegungen ein, sobald im Experiment für einen Wechsel von Licht und Dunkelheit gesorgt wird. So hat denn Pfeffer geschlossen, daß die periodischen Bewegungen rein paratonische Erscheinungen sind, Kombinationserfolge der direkten Induktionen und ihrer Nachwirkungen.

Schon zwei Jahre vor Pfeffers eben erwähnter Publikation (1905) hatte Semon einige Versuche mitgeteilt, deren Resultate ihn zu der alten Auffassung einer erblich fixierten Rhythmik zurückführten. Er arbeitete ebenfalls mit Albizzia lophantha und fand, daß Blätter von Keimpflanzen, die niemals der Tagesperiode ausgesetzt worden waren, bei 6:6- oder 24:24-stündigem Wechsel von Licht und Dunkelheit, immer einen 12:12-stündigen, also tagesrhythmischen Bewegungsturnus erkennen ließen. Ausklingen der Schlafbewegungen im konstanten Licht und bei konstanter Dunkelheit erklärt Semon durch die Annahme, daß sich die Pflanzen unter diesen Umständen in einem pathologischen Zustand befinden, der die Reaktionen hemmt. Man wird es begreiflich finden, daß diese Annahme nicht sehr viel Anklang gefunden hat. Denn einmal werden viele Pflanzen durch sehr lange andauerndes konstantes Licht nicht geschädigt und zeigen wieder normale Schlafbewegungen, sobald der Tageswechsel wiederkehrt. Das hat schon 1873 Schübeler durch ein interessantes Experiment gezeigt, und zwar gerade mit denselben Pflanzen, mit denen auch Semon gearbeitet hat. Er beobachtete in den Sommermonaten Exemplare von Albizzia lophantha und Mimosa pudica in Alten in Norwegen (70° nördl. Breite), zu einer Zeit also, während der die Sonne dauernd über dem Horizont stand. Die Blätter führten keine tagesrhythmischen Bewegungen aus.

Dazu kommt nun, daß sich gegen Semons Versuchsanstellung mancherlei Einwände erheben lassen. Daß bei Albizzia lophantha ein 6:6-stündiger Bewegungsrhythmus durch entsprechenden Lichtwechsel leicht induziert werden kann, ohne daß dabei eine merkliche 12:12-stündige Periodizität zum Ausdruck kommt, kann nach Pfeffers auf viel exakterem Wege gewonnenen Kurven nicht bezweifelt werden. Worauf nun Semons abweichende Resultate beruhen, läßt sich allerdings schwer sagen. Er hat im allgemeinen mit geringerer Lichtintensität (10 kerzige Kohlenfadenlampe) gearbeitet als Pfeffer, doch hat Pfeffer zur Kontrolle ungefähr gleichstarkes Licht verwandt, ohne andere Resultate zu erhalten. Immerhin war die spektrale Intensitätsverteilung des Lichtes in beiden Fällen nicht die gleiche (Pfeffer benutzte Tantallampen), und da wir aus Hoffmanns und namentlich Berts Untersuchungen wissen, daß die blauen Strahlen auf die Schlafbewegungen anders (intensiver) wirken als die roten, so könnte die „physiologische" Intensität beider Lichtquellen doch sehr verschieden gewesen sein. Auch war die Temperatur in Semons Versuchen nicht konstant. Wenn daher auch Semon seine Annahme experimentell nicht einwandfrei bewiesen hat, so hat sich doch in der Folgezeit ergeben, daß ihr etwas Richtiges zugrunde liegt.

Wir sind oben absichtlich nicht näher darauf eingegangen, wie sich im Dauerlicht oder in konstanter Dunkelheit die Nachschwingungen der Blätter verhalten, die in einem kürzeren oder längeren als 12:12-stündigen Rhythmus beleuchtet waren. Eine Durchsicht der Pfefferschen Kurven ergibt, daß diese Blätter eigentlich niemals das Tempo des vorhergehenden Beleuchtungswechsels einhalten. Es besteht, wie Pfeffer selbst mehrfach hervorhebt, bei den Nachschwingungen die Tendenz zu einer 12:12-stündigen Periodizität. Besonders ausgesprochen ist dies bei Phaseolus; die Primärblätter dieser Pflanzen unterscheiden sich von denen von Albizzia nebenbei bemerkt auch dadurch, daß sie auf einen kürzeren als 6:6-stündigen Beleuchtungswechsel nur durch geringe Veränderungen im Verlauf ihrer kurzrhythmischen autonomen Bewegungen reagieren.

Eine recht befriedigende Erklärung für diese doch immerhin auffällige Eigenschaft der Nachschwingungen war damals nicht gegeben worden. Neuerdings (1911) hat nun Pfeffer selbst eine Tatsache entdeckt, die auf die Beurteilung der Ursachen der Schlafbewegungen ein ganz neues Licht wirft. Verdunkelt man das Gelenk der Primärblätter von Phaseolus, so zeigt sich

zunächst insofern keine Veränderung, als die Blätter im Tageswechsel ganz normale Schlafbewegungen ausführen. Auch bei Verschiebung des Beleuchtungswechsels um 12 Stunden (Beleuchtung nachts und Verdunkelung am Tage) passen sich die Blätter dem vollkommen an. Bringt man nun Blätter mit verdunkeltem Gelenk, die normale tagesrhythmische Schlafbewegungen ausführen, in Dauerlicht, so werden diese Bewegungen in unverminderter Größe fortgesetzt und klingen anscheinend überhaupt nicht aus. Wenigstens beobachtete Pfeffer ihren ungeschwächten Fortgang 8 bis 12 Tage lang, während bei Blättern mit unverdunkeltem Gelenk sich gewöhnlich schon am zweiten Tage eine ganz erhebliche Verringerung der Amplitude zeigt. Das deutet allerdings darauf hin, daß das Gelenk durch die dauernde, Beleuchtung irgendeine, wenn man will, pathologische Veränderung erfährt, die es zur Einleitung der tagesperiodischen Bewegungen unfähig macht. Jedenfalls ist jetzt die Tatsache kaum noch zu bestreiten, daß tagesrhythmische Bewegungen existieren, die unabhängig von gleichsinnigen Veränderungen der Außenwelt zur Geltung kommen und somit auf spezifischen inneren Eigenschaften der Pflanze beruhen müssen.

Wenn sich gegen Pfeffers Versuche vielleicht noch der eine, obwohl unwahrscheinliche Einwand erheben läßt, daß unter den beschriebenen Versuchsbedingungen ein Ausklingen nicht völlig verhindert, sondern nur weit hinausgeschoben worden ist, so wird er entkräftet durch Versuche, die etwa gleichzeitig und unabhängig von Pfeffer R. Stoppel angestellt hat. Es ist klar, daß die Frage in wirklich eindeutiger Weise gelöst werden kann, wenn man zu den Untersuchungen Pflanzen verwendet, die niemals einem täglichen Beleuchtungswechsel ausgesetzt waren. Das hat wohl zuerst in nachdrücklicher Weise Jost hervorgehoben. Stoppel kultivierte Phaseoluspflanzen in völliger Dunkelheit und konstanter Temperatur. Da die Keimblätter sehr viel Reservematerial enthalten, kann man gut entwickelte Primärblätter bekommen, wenn man in geeigneter Weise (durch Entknospung) dafür sorgt, daß diesen die Nährstoffe zugeführt werden. Diese Blätter führen nun ganz normale tagesperiodische Schwingungen aus. Hier ist keine andere Deutung ersichtlich als die, daß die Rhythmik eine autonome, ererbte ist. Wie sie phylogenetisch entstanden ist, darüber geben derartige Versuche natürlich keine Anhaltspunkte. Als einwandfreier Beweis für die Existenz der Vererbung erworbener Eigenschaften, als welchen Semon die Erscheinung anzusehen geneigt ist, kann sie jedenfalls nicht gelten.

Inwieweit nun diese autonomen periodischen Bewegungen bei dem unter normalen Vegetationsbedingungen zu beobachtenden Tagesrhythmus der Blätter eine Rolle spielen, läßt sich noch nicht ganz beurteilen. Pfeffer vermutet wohl mit Recht, daß diese Rolle keine sehr wesentliche ist. In der Tat haben ja die Lichtverhältnisse einen großen Einfluß auf die Blattbewegungen, wie wir an den starken photonastischen Reaktionen bei abgekürzter oder verlängerter Beleuchtungsperiode sehen. Natürlich machen sich dieselben Effekte bei normalem Tag- und Nachtwechsel geltend. In diesem Punkte weicht also unsere heutige Auffassung erheblich von der früherer Forscher ab, die in den Schlafbewegungen nichts anderes als eine durch Außenfaktoren regulierte (entsprechend verschobene) autonome Periode sahen. Ueber die Wirkung dieser Außenfaktoren, in erster Linie von Licht und Dunkelheit, sind wir jetzt, namentlich durch die Untersuchungen Pfeffers, besser orientiert.

Ueber die spezielle Natur dieser paratonischen Einflüsse wollen wir noch wenige Worte anfügen. Es hat sich nämlich gezeigt, daß sich durchaus nicht alle Blätter in dieser Beziehung gleich verhalten. Albizzia und Mimosa reagieren z. B. auf Beleuchtung sehr schnell durch Auseinanderklappen (Tagstellung), auf Verdunkelung ebenso schnell durch Zusammenschließen (Schlafstellung) der Blätter. Bedingung dafür ist allerdings, daß die der Belichtung vorausgehende Dunkelheit (und umgekehrt) eine gewisse (im Einzelfalle sehr verschiedene) Zeit gedauert hat. Wir konstatieren hier eine zweite Wirkung von Licht und Dunkelheit: sie müssen in dem Blatt die Stimmung für die Wirkung eines Reizes schaffen, müssen das Blatt in bestimmter Weise reizempfänglich machen. Bei den Blättern von Phaseolus, Impatiens u. a. löst nun die am Morgen beginnende Beleuchtung die Senkbewegung (Nachtstellung) aus, welche am späten Nachmittag ihren tiefsten Stand erreicht und dann zurückgeht (Gegenreaktion). Ob bei Phaseolus Dunkelheit überhaupt wirkt, ist fraglich. Bei Impatiens, das sich im übrigen gleich verhält, erzeugt plötzliche Verdunkelung eine ziemlich schnelle, vorübergehende Abwärtskrümmung, also eine ebenso gerichtete Bewegung wie das Licht, das allerdings länger wirken muß. Bemerkenswert ist, daß beim Blatt von Mimosa Speggazzinii beide Typen verwirklicht sind: der primäre Blattstiel reagiert auf Licht nach dem Phaseolustypus, die Blättchen wie die von Albizzia.

Man nennt vielfach die ziemlich schnell nach Belichtung oder Verdunkelung erfolgenden Reaktionen (Albizziatypus) Uebergangsreaktionen und den entsprechenden Reiz Uebergangsreiz. Wenn auch nicht be-

stritten werden soll, daß das plötzliche (aufsteigende oder absteigende) Gefälle hier perzipiert wird, so bildet es doch nicht allein den Reiz, denn es hängt (wie Pfeffer mit Recht hervorgehoben hat) das Ausmaß der Bewegung auch bei diesen relativ schnell reagierenden Blättern sehr wesentlich von der Dauer der (nicht nur vorausgehenden sondern vor allem nachfolgenden, als Reiz wirkenden) Beleuchtung bezw. Verdunkelung ab. Das Gefälle kann übrigens verschieden stark sein, ohne den Gang der Reaktion wesentlich zu beeinflussen. Doch bleibt noch zu prüfen, wie sich die Blätter bei sehr langsamer Zu- und Abnahme der Lichtintensität verhalten.

Einen Reiz, der lange einwirken muß, um einen bestimmten Effekt hervorzubringen, nennt man häufig Dauerreiz. So wirkt das Licht bei Phaseolus, Impatiens, Siegesbeckia u. a. Es ist beachtenswert, daß diese Lichtwirkung in den bekannten Fällen die umgekehrte ist wie bei obigem Typus; das beruht wohl darauf, daß die vorausgehende Dunkelheit in den Albizzia- und Mimosablättern einen Reizzustand induziert, auf den das folgende Licht in schnellerer und anderer Weise anspricht als bei Phaseolus usw. Wir werden übrigens sehen, daß es Fälle gibt, wo das Licht in ein und demselben Organ und nicht wie beim Mimosablatt in getrennten Partien, Uebergangs- und Dauer-(Folge-)Reaktion erzeugt.

Lichtmangel (Dunkelheit) scheint nicht als Dauerreiz wirken zu können.

Sehr intensives Licht ruft bei einigen Blättern Erscheinungen hervor, die unter dem Namen „Tagesschlaf“ bekannt sind. Aeußerlich gleicht diese Erscheinung in einigen Fällen der Nachtstellung (z. B. bei Oxalis), mit der sie aber ihrem Wesen nach kaum etwas zu tun hat.

Es ist klar, daß auch heliotropische Reaktionen die Stellung der Blätter beeinflussen müssen; ihr Einfluß kann sich z. B. in einer Hintanhaltung der abendlichen Senkbewegung äußern. In allen bisherigen Untersuchungen sind heliotropische Reaktionen nicht völlig ausgeschlossen gewesen; sie würden es auch dann nicht sein, wenn man Sorge tragen würde, die Blätter allseits völlig gleichmäßig zu beleuchten. Diese Trennung und damit die Isolierung der rein photonastischen Reaktionen bleibt noch durchzuführen. Sehr wahrscheinlich ist es zwar nicht, daß das Bild nach gänzlicher Ausschaltung des Phototropismus sich wesentlich verschieben wird, doch läßt sich bestimmtes in dieser Beziehung nicht voraussagen.

Einfluß der Temperatur. Thermonastie. Der Einfluß von Temperaturänderungen auf die Bewegungen der Laubblätter (Thermonastie) ist besonders von Jost untersucht worden. Jost arbeitete zum Teil mit Blättern, die im Dunkeln aufgewachsen waren. Er konnte dieselben in normaler Ausbildung erziehen, indem er einen Sproß der Pflanze in einen dunklen Raum führte und alle Gipfel- und Seitenknospen an der Pflanze entfernte. Bei diesen Blättern waren also Nachwirkungen durch vorhergehenden Lichtwechsel ausgeschlossen, mit denen man rechnen muß, wenn man grüne Blätter im Dunkeln beobachtet. Doch ließen sich auch mit letzteren übersichtliche Resultate gewinnen. Langsame Temperatursteigerung bewirkte z. B. bei Phaseolus und Robinia Erhebung der Blättchen, bei Acacia und Mimosa Ausbreitung, in beiden Fällen also Einrücken in die „Tagstellung“. Plötzliches Ansteigen bringt den gleichen Effekt hervor wie sehr intensives Licht, verursacht also bei letzteren Schlafstellung, bei ersteren dagegen Reaktionen, die mit den sogenannten paraheliotropischen Bewegungen (vgl. S. 233) übereinstimmen. Abkühlung führte in allen Fällen zur Schlafstellung (Kosanin).

Da wir jetzt wissen, daß bei Phaseolus das Licht die abendliche Senkbewegung, bei Acacia und Mimosa dagegen die Ausbreitung der Blättchen induziert, so würden Temperaturerhöhung und Beleuchtung auf die Blätter der ersteren Pflanze ungleichsinnig, auf die der beiden letzteren gleichsinnig wirken. Demgegenüber fand nun Pfeffer, daß Temperatursteigerung bei Phaseolusblättern, deren Schlafbewegungen im konstanten Licht aufgehört haben, ebenso wirkt wie Licht, also Senkung hervorruft. Es bleibt noch zu untersuchen, wie sich dieser Widerspruch aufklärt.

Im allgemeinen dürfen wir sagen, daß der Lichtwechsel auf Blätter in der Natur gewöhnlich einen stärkeren Effekt hat als Temperaturwechsel. Doch kommt es natürlich darauf an, welche Intensitäten bezw. Wärmedifferenzen wirken; darüber liegen noch keine eingehenden Versuche vor.

Einfluß der Schwerkraft. Ueber den Einfluß der Schwerkraft auf die Schlafbewegungen liegen verschiedene Erfahrungen vor. 1875 beobachtete Pfeffer, daß Phaseolusblätter in der Inversstellung (Oberseite nach unten) ihre Bewegungen in der gleichen Richtung fortsetzen (in bezug auf die Pflanze also umkehren!). A. Fischer zeigte dann später, daß am Klinostaten bei gleichmäßiger Rotation um die horizontale Achse die periodischen Bewegungen der Phaseolusblätter nach einiger Zeit eingestellt werden. Die Dorsiventralität des Gelenks ist bei Phaseolus keine stabile, sondern kann durch die Schwerkraft verändert werden; sie wird bei Inversstellung umgekehrt, wie

obiger Versuch zeigt; am Klinostaten ruft der diffuse Schwerereiz eine physiologisch radiäre (oder bilateralsymmetrische?) Struktur hervor und unter diesen Bedingungen sind natürlich die Schlafbewegungen, die als nastische Reaktionen von einer dorsiventralen Struktur abhängen, ausgeschlossen. Die autonomen tagesperiodichen Bewegungen werden in bezug auf die Pflanze gleichfalls umgekehrt, wenn die Blätter invers gestellt werden (Stoppel 1912). Somit ist also bei Phaseolus das Zustandekommen der Schlafbewegungen nur bei einseitiger Schwerkraftwirkung möglich. Sie deshalb nicht als autonome, sondern vielleicht als geotropische Reaktionen zu bezeichnen, liegt kein Grund vor, wenn man mit Pfeffer unter autonomen Bewegungen solche versteht, „die bei völliger Konstanz der Außenbedingungen durch die Eigentätigkeit des Organismus vollbracht werden". Die Tendenz zu periodischer Bewegungstätigkeit ist eine spezifische Eigentümlichkeit des Blattes. Sie kann aber nur zum Ausdruck kommen, wenn im Gelenk durch die Schwerkraft die Dorsiventralität induziert ist. Wollten wir alle Reaktionen, zu deren Zustandekommen die einseitige Wirkung einer Kraft nötig ist, als tropistische bezeichnen, so würde man z. B. die Induktion der Polarität durch Licht (bei Equisetum) oder die der Dorsiventralität bei Farnprothallien als solche ansehen müssen — eine Konsequenz, die wohl wenige teilen werden. Geotropismus kommt außerdem bei Phaseolusblättern vor, denn sie haben die Tendenz, sich in eine bestimmte Gleichgewichtslage zur Schwerkraft einzustellen.

Fischer hat Blätter, deren Schlafbewegungen wie diejenigen bei Phaseolus von der Schwerkraft abhängen, als geonyktitropische (besser — nastische!) bezeichnet (Lupinus albus) und sie von den autonyktitropischen (bezw. -nastischen) unterschieden, die am Klinostaten die periodischen Bewegungen nicht einstellen (Amicia zygomeris, Desmodium gyrans, Mimosa pudica u. a.). Bei letzteren ist also die Dorsiventralität des Gelenks durch diffuse Schwerkraftreizung nicht ausschaltbar.

Daß einer soweit verbreiteten Erscheinung wie den Schlafbewegungen der Laubblätter, die sich in den verschiedensten Familien findet und durch ganz heterogene Mittel erreicht wird, irgendein Nutzen im Dienste der Pflanze zukommen muß, darüber sind sich wohl alle Naturforscher einig, auch wenn dieser Nutzen hier bei weitem nicht so offensichtlich ist wie etwa bei einigen blütenbiologischen Einrichtungen. Zuerst hat sich Darwin (1881) eingehender mit der Frage beschäftigt. Er erblickt in der Schlafstellung einen Schutz gegen zu starke nächtliche Wärmeausstrahlung. In der Tat ließ sich zeigen, daß Blätter, die künstlich in der Tagstellung gehalten wurden, in kühlen Nächten viel stärkere Schädigungen erleiden als die normal schlafenden. Darwin hat auch beobachtet, daß sich auf den an der Schlafbewegung verhinderten Blättern viel mehr Tau niederschlägt als auf den anderen. Daran knüpft Stahl an, der in dem Schutz gegen Betauung den Zweck der Schlafbewegungen sieht. Ausgehend von der Beobachtung, daß die zu Schlafbewegungen befähigten Blätter nachts ihre Spaltöffnungen nicht schließen und ziemlich erheblich transpirieren, glaubt Stahl, daß die Herabsetzung der nächtlichen Taubildung auf Erhaltung der Transpiration, die zur Nährsalzzufuhr aus dem Boden nötig ist, hinzielt. Es entspricht dieser Voraussetzung, daß sich bei betauten Blättern ein geringerer Transpirationsstrom nachweisen läßt. Wie Stahl selbst betont, ist damit aber Darwins Deutungsversuch nicht widerlegt, er könnte, wenigstens für unser Klima, sehr wohl daneben zu Recht bestehen.

β) Schlafbewegungen der Blüten. Wir gehen nun zur Betrachtung des Oeffnens und Schließens der Blüten über und beginnen auch hier mit den vorwiegend photonastischen Blüten. Während die Blätter im allgemeinen tagsüber eine horizontal ausgebreitete Stellung einnehmen (nur bei sehr intensivem Licht verhalten sich manche anders), nachts zum Horizont (durch Aufrichten oder Senken) mehr oder weniger geneigt sind, ist bei den Blüten keine solche Regelmäßigkeit zu finden. Wir können daher von einer geöffneten Blüte nicht ohne weiteres sagen, sie befinde sich in Tagstellung, denn viele zeigen gerade nachts den größten Oeffnungswinkel, so z. B Mirabilis Jalapa, Cereus grandiflorus („Königin der Nacht"), Oenothera biennis („Nachtkerze"), Silene noctiflora, Lychnis vespertina, Saponaria officinalis, Nicotiana affinis. Es ist das eine Anpassung an die durch Nachtschmetterlinge vermittelte Bestäubung. Die Mehrzahl der photonastischen Blüten ist allerdings nachts geschlossen, so Nymphaea, Oxalis, viele Mesembryanthemumarten, Gentiana, Convolvulus, Specularia und namentlich die Cichoriaceen und andere Compositen.[1]) Sie sind an Tagbestäuber angepaßt und scheinen sich vor nächtlichen Eindringlingen schützen zu müssen.

Die Bewegungen der oben genannten Blüten in der Natur sind durchaus nicht rein photonastische, es wirken auch

[1]) Es sollen der Einfachheit halber im folgenden die Blütenköpfchen der Compositen als Blüten bezeichnet werden. In ökologischer und physiologischer Beziehung verhalten sie sich ja tatsächlich wie Einzelblüten. — Bei den Cichoriaceen beteiligen sich sämtliche Einzelblüten des Köpfchens an den Bewegungen, bei den mit Rand- und Scheibenblüten versehenen nur die ersteren.

thermische Reize mit. Doch dürfte der Lichteinfluß vorwiegen. wenigstens ist es bei einer Reihe dieser Blüten Pfeffer (1873) nicht gelungen, durch Temperaturveränderungen die photonastischen Wirkungen wesentlich zu beeinflussen (vgl. auch Stoppel 1910). Doch ist das Zusammenwirken von Licht- und Temperaturwechsel in den Einzelfällen bei weitem noch nicht genügend untersucht. Sicher wissen wir, daß in einigen Fällen (Crocus, Tulipa), der Temperatureinfluß sehr stark überwiegt. Diese wollen wir unten gesondert behandeln.

Die allgemeine Unterscheidung zwischen Tag- und Nachtblühern ist nicht so zu verstehen, daß erstere unbedingt den ganzen Tag, letztere die ganze Nacht geschlossen wären. Manche öffnen sich im Laufe des Nachmittags und schließen sich erst nach Sonnenaufgang wieder; andere sind um Mitternacht nur wenige Stunden geöffnet (wie die „Königin der Nacht"); von den tagblütigen öffnen sich manche schon vor Sonnenaufgang, um sich am Vormittag bereits wieder zu schließen, andere sind während des größten Teils des Vor- und Nachmittags geöffnet. Man unterscheidet hier zwischen „Früh- und Spätschließern". Strenge Unterscheidungen durchzuführen ist schon deshalb nicht möglich, weil, wie wir noch sehen werden, die Zeit des Oeffnens und Schließens in hohem Maße von den Außenbedingungen, die ja in der Natur niemals gleiche sind, bestimmt wird. Das gilt mehr oder weniger für alle Blüten, und wenn daher Linné eine Gruppe (die „Aequinoctiales") von den anderen abgesondert hat als solche, deren Oeffnungs- und Schließungszeiten unabhängig von der Außenwelt sein sollen, und diese zur Zusammenstellung seiner bekannten Blumenuhr verwandt hat, so dürfen wir an die Zuverlässigkeit dieser Uhr keine allzu hohen Ansprüche stellen.

Blüten, die sich in der Natur gewöhnlich nur einmal öffnen und nach dem Schließen verblühen, nennt man ephemere zum Unterschied von den periodisch beweglichen, die die gleichen Vorgänge an aufeinanderfolgenden Tagen mehrmals wiederholen. Ephemere Blüten finden sich z. B. bei Arten der Gattungen Mirabilis, Cereus, Cistus, Helianthemum, Portulaca, Lactuca, Mulgedium u. v. a., periodisch bewegliche bei Nymphaea, Bellis, Calendula, Tragopogon, Taraxacum, Hieracium usw. Eingehende Zusammenstellungen gibt Hansgirg (1896).

Wir wenden uns nun der Untersuchung des Einflusses von Licht und Dunkelheit auf die Blütenbewegungen zu. De Candolle (1805) hat diese Frage zuerst experimentell in Angriff genommen und gezeigt, daß man die Oeffnung von Mirabilis Jalapa-Blüten auf den Tag verlegen kann, wenn man die Pflanze nachts beleuchtet und tagsüber verdunkelt. Aehnliches fanden er und später auch Meyen (1839) bei verschiedenen periodisch beweglichen Blüten. Auch beobachtete de Candolle, daß die Schließungszeit bei trübem Wetter bei gewissen Tagblütern eine andere ist als bei hellem; er wagte aber nicht zu entscheiden, ob hier ausschließlich Lichtwirkungen vorliegen oder ob die Feuchtigkeit beteiligt ist. Durch die sich anschließenden Arbeiten hat das Problem keine erhebliche Förderung erfahren. Einen wesentlichen Fortschritt bedeuten erst die experimentellen Untersuchungen Pfeffers (1873 und 1875), der sein Augenmerk zwar hauptsächlich auf die Temperatureinflüsse auf Blüten gerichtet hat, daneben aber auch über die Wirkung von Licht und Dunkelheit wichtige Beobachtungen machte. Pfeffer fand, daß Blüten von Oxalis rosea, in geringem Maße auch die von Bellis perennis, im Dunkeln und bei konstanter Temperatur ihre tagesperiodischen Bewegungen fortsetzen. Beleuchtung von Oxalisblüten, welche sich im Dunkeln entwickelt hatten und nur bis zur parallelen Stellung der Kronblätter aufblühten, hatte eine sehr schnelle Oeffnung zur Folge. Umgekehrt kann Verdunkelung Schließung bewirken, doch ist es keineswegs gleichgültig, zu welcher Tageszeit sie die in periodischer Bewegung befindlichen Blüten trifft. Wurden völlig geöffnete Blüten von Calendula officinalis, Leontodon hastilis und Venidium calendulacea morgens von 11 bis 12 Uhr verdunkelt, so machte sich nur eine geringe Schließbewegung bemerkbar; nachmittags dagegen schlossen sie sich nach Lichtentzug schneller und früher als die im normalen Tageswechsel beleuchteten Kontrollexemplare. Andererseits erfolgte die morgendliche Oeffnung früher bei starker Beleuchtung als bei schwacher. Durch direkte Besonnung, also sehr intensives Licht, wurden, wie schon Royer beobachtet hatte, völlig geöffnete Blüten zu einer Schließbewegung veranlaßt.

Aus diesen Versuchen Pfeffers geht hervor, daß das Licht sehr verschiedenartige Effekte erzeugen kann, und daß der Einfluß der Verdunkelung in hohem Maße von dem jeweiligen Zustand der Blüte abhängt. Nähere Aufschlüsse hierüber haben die Untersuchungen von Oltmanns gebracht. Sie bestätigten zunächst, daß an hellen Tagen die Oeffnung früher erfolgt als an trüben, das Licht kann also zweifellos als Oeffnungsreiz wirksam sein. Weiter aber zeigte sich, daß die Zeit des Offenseins bei starker Beleuchtung kürzer ist als bei gedämpftem Licht. Verdunkelt man von einer Reihe Blüten (etwa von Tragopogon brevirostris, das sich meist schon im Laufe

des Vormittags schließt), einige um 8 Uhr, andere $8^1/_4$ Uhr u. s. f. in ungefähr viertelstündigen Abständen, so ergibt sich das auf den ersten Blick merkwürdige Resultat, daß die zuerst verdunkelten sich zuletzt schließen. Der Schluß wird also durch

a



b



Fig. 7. Calendula officinalis. Verkleinert. a im geöffneten Zustand (mittags), b im geschlossenen (nachts).

Licht von bestimmter Dauer und Intensität gefördert, durch vorzeitige Verdunkelung oder lange, aber schwache Beleuchtung hinausgeschoben. Da nun Tragopogon zu den Frühschließern gehört und an hellen Tagen die Schließung schon beginnt, während die Lichtintensität noch im Steigen begriffen ist, so ist die Folgerung fast unabweislich, daß das Licht selbst es ist, welches die Schließung hervorruft. Wenn Oltmanns noch gewisse Bedenken trug, diese Konsequenz auch auf die periodisch beweglichen Blüten auszudehnen, so mag das daran liegen, daß sein Versuchsobjekt (Bellis perennis) kein besonders geeignetes war, weil dessen Blüten gegen Temperaturdifferenzen ziemlich empfindlich sind und außerdem unter gewissen Bedingungen anscheinend starke Nachschwingungen einer vorher induzierten Periodizität, vielleicht auch autonome Bewegungen zeigen, die bei Oltmanns' Versuchsanordnung die Resultate trüben mußten.

In der Tat sind wir berechtigt, auch für periodisch bewegliche Blüten eine schließende Wirkung des Lichtes anzunehmen; das zeigen unzweideutig Versuche von Stoppel (1910) an Calendula arvensis. Um präzise Versuchsbedingungen zu haben, war es nötig, bei konstanter Temperatur zu arbeiten und über eine Lichtquelle zu verfügen, deren Intensität sich annähernd gleich bleibt. Wenn man nun Calendulablüten zunächst in tagesrhythmischem Wechsel beleuchtet, so öffnen sie sich vormittags langsam bis gegen Mittag; gegen Abend sind sie wieder geschlossen. Diese Schließbewegung tritt auch ein, wenn man das Licht vom Vormittag an in konstanter Intensität fortwirken läßt. So behandelte Blüten öffnen sich aber am nächsten Morgen nicht wieder, sondern bleiben bis zum Verblühen geschlossen; höchstens macht sich noch eine schwache, ganz langsam fortschreitende Aufblühtendenz geltend, die aber jedenfalls mit sekundären Erscheinungen zusammenhängt, welche wir hier nicht zu berücksichtigen brauchen. Die schließende Wirkung des Lichts läßt sich auch dann sehr deutlich erkennen, wenn man Pflanzen dauernder Beleuchtung aussetzt, noch ehe die Knospen geöffnet sind. Die Blüten gehen dann niemals völlig auf; sie beginnen wohl ganz langsam (unter unregelmäßigen Oszillationen) eine Aufblühbewegung, die mehrere Tage währt; doch kehrt diese, lange ehe der unter normalen Bedingungen maximale Oeffnungswinkel erreicht ist, um.

Neben dieser schließenden Wirkung des Lichts, die man als Dauerreaktion oder Folgereaktion bezeichnen kann, gibt es aber, wie schon aus dem Vorhergehenden folgt, noch eine öffnende, die sogenannte Uebergangsreaktion. Sie tritt gleich oder sehr bald nach Beleuchtung ein, für ihr Zustandekommen ist eine vorausgehende, nicht zu kurz währende Verdunkelung Vorbedingung. Wie lang diese sein muß, das läßt sich nicht ohne weiteres angeben. Es wirken hier sehr verschiedenartige Umstände mit: einmal die Bewegungsphase, in der sich die Blüte gerade befindet. Hat die Schließbewegung im Dunkeln eben begonnen,[1]) so läßt sich durch plötzliche Beleuchtung überhaupt keine rückgängige Bewegung (Oeffnung) induzieren (wenigstens nicht bei den Lichtintensitäten, deren Einfluß von Stoppel untersucht worden ist). Ferner die der Verdunkelung vorausgehende Belichtungszeit. Ist eine Blüte im Dauerlicht gehalten worden, so genügt oft einstündige Verdunkelung, um ihre Stimmung so zu verändern, daß die darauffolgende Beleuchtung eine sehr starke Oeffnungsbewegung auslöst.

Dunkelheit hat auf Calendulablüten als

[1]) Das ist z. B. zu erreichen durch Verdunkelung der Blüte einige Zeit vor der maximalen Oeffnung.

Uebergangsreiz schließende Wirkung; eine Dauerreaktion scheint bei längerer Verdunkelung nicht aufzutreten. In anderer Beziehung ist aber das Verhalten in dauernder Dunkelheit sehr bemerkenswert. Die Blüten entwickeln sich sehr gut weiter, wenn man sie schon im Knospenstadium ins Dunkle bringt, öffnen sich und zeigen dann einen Bewegungsrhythmus, der mit großer Annäherung die 12:12-stündige Periode innehält. Das ist ohne Zweifel eine autonome Periodizität. Auch unter anderen Bedingungen als in konstanter Dunkelheit kann diese zum Ausdruck kommen. Calendulablüten sind nämlich nur in beschränktem Maße fähig, sich einem verkürzten Beleuchtungsrhythmus anzupassen. Auf einen 6:6-stündigen reagieren sie noch sehr prompt, dagegen kaum oder nicht mehr auf einen 4:4- oder 2:2-stündigen. Im letzteren Falle erhalten wir nun nicht etwa bei der graphischen Aufzeichnung gerade Linien, sondern Kurven, die ebenso wie die Dunkelkurven alle 24 Stunden die höchste Erhebung bezw. Senkung zeigen. Hier kommt also die autonome Bewegung zum Vorschein. Es läßt sich beweisen, daß sie in ihrem Gang durch die Beleuchtungsverhältnisse anderer Teile derselben Pflanze nicht beeinflußt wird; auch konnte gezeigt werden, daß sie auftritt, wenn die Pflanzen vom Keimling an ganz unregelmäßig (arhythmisch) beleuchtet waren.

Der auffällige Unterschied in der Wirkung konstanter Verdunkelung und konstanten Lichts beruht wohl darauf, daß die Blüten nicht in Dunkelstarre verfallen (die vermutlich nur bei chlorophyllführenden Organen vorkommt), dagegen eine ausgesprochene Lichtstarre zeigen, die die autonomen periodischen Bewegungen völlig unterdrückt Die Tendenz zu diesen Bewegungen besteht aber auch im Dauerlicht fort (Stoppel und Kniep 1911).

Wir fassen kurz zusammen: Die Blüten von Calendula arvensis führen autonome, tagesperiodische Bewegungen aus, sind aber außerdem paratonischen Einflüssen stark unterworfen. Licht hat eine doppelte Wirkung: als „Uebergangsreiz" öffnend, als „Dauerreiz" schließend. Dunkelheit wirkt nur als „Uebergangsreiz" und zwar schließend. Diese ganzen Erscheinungen sind, wie leicht ersichtlich, den bei Phaseolusblättern nachgewiesenen sehr ähnlich. Was die letzteren von Calendula unterscheidet, das ist die Unempfindlichkeit gegen „Uebergangsreize". So vereinigt Calendula gewissermaßen in sich den Albizzia- und Phaseolustypus.

Noch eine kurze Bemerkung über die Lichtwirkung sei anhangsweise gestattet. Schon Oltmanns hat die Vermutung ausgesprochen, daß die schließende Wirkung des Lichts nicht allein eine Funktion der Intensität ist, sondern von einer zweidimensionalen Größe, der Lichtmenge (Intensität × Zeit der Einwirkung) abhängt, weil intensiveres Licht bei kürzerer Einwirkung anscheinend denselben Einfluß hat wie schwächeres bei entsprechend längerer. Nach den neueren Untersuchungen über Phototropismus (Blaauw, Fröschel, Pringsheim, vgl. darüber den vorigen Abschnitt „Tropismen") ist das sehr wahrscheinlich; ja es ist sehr wohl möglich, daß dieses Reizmengengesetz auch für Reizvorgänge gilt, die die sogenannte Uebergangsreaktion einleiten. Hoffen wir, daß quantitative Studien über den Einfluß verschiedener Lichtintensitäten auf die Schlafbewegungen diesen Punkt bald aufklären!

Thermonastie. Die Thermonastie der Blüten können wir nach dem Vorausgehenden nunmehr ziemlich kurz erledigen. Auf Temperaturschwankungen reagieren, wie erwähnt, in hohem Maße die Blüten von Crocus und Tulipa. Temperaturerhöhung bewirkt Oeffnung, Temperaturerniedrigung Schließung. Pfeffer (1873) konnte bei Crocus schon bei Temperaturerhöhung von 0,5° eine deutliche Oeffnungsbewegung beobachten. Nach plötzlicher, starker Temperaturerhöhung (etwa um 10°) kann diese Bewegung sehr schnell fortschreiten bis zu einem Oeffnungswinkel, der nicht erreicht werden würde, wenn die gleiche Temperatursteigerung langsamer vorgenommen worden wäre. Die Blüte schießt gewissermaßen über ihr Ziel hinaus; es folgt dann bald eine rückläufige (Schließ-) Bewegung, bis die der erhöhten Temperatur entsprechende Gleichgewichtslage eingenommen wird (Jost 1898). Durch sehr langsame Temperatursteigerung kann man die Oeffnungsbewegung lange im Gang halten, da die rückläufige Tendenz dann immer durch die erneute Temperaturerhöhung überwunden wird. Hier tritt also jedenfalls keine starke Abstumpfung infolge der langen Reizung ein; im Bereich höherer Temperaturen muß die Steigerung pro Zeiteinheit mehr Grade betragen als bei niederen (Jost).

In der Natur sind die Bedingungen für eine solche langsam fortschreitende Oeffnung häufig geschaffen. Wir beobachten da, daß die Tulpen am Vormittag langsam aufgehen bis zu einem Maximum, und am Nachmittag mit sinkender Temperatur sich wieder schließen. Es kann aber auch vorkommen, daß die Schließbewegung schon einsetzt, während die Temperatur noch steigt, dann erfolgt eben die Steigerung nicht schnell genug und kann die induzierte Schließungsreaktion nicht überwinden.

Pfeffer hat schon gefunden, daß bei Crocus- und Tulipablüten zu jeder Tageszeit durch Temperaturerhöhung Oeffnen (und

umgekehrt) erzielt werden kann; unter günstigen Bedingungen konnte er Crocusblüten beim Uebertragen aus 12° in 22° sich schon in 3 Minuten völlig öffnen sehen. Es hängt jedoch sehr vom Zustande der Pflanze ab, in welchem Maße sie reizempfänglich ist. So sind z. B. Blüten kurz nach der Schließung viel unempfindlicher als solche, die längere Zeit geschlossen waren. Blüten von Compositen und Oxalis, die an sich auch thermonastisch empfindlich sind, können abends nach erfolgtem Schluß überhaupt nicht wieder zur Oeffnung gebracht werden, wenn die Temperatur erhöht ist.

Es ist möglich, daß die vorhin erwähnte Schließung, die nach Verbringen der Blüten in eine höhere Temperatur der Oeffnung folgt, etwas Aehnliches ist wie die Wirkung des Dauerlichts auf die Calendula, so daß wir hier in ähnlicher Weise zwei von demselben Reiz ausgehende, einander entgegengerichtete Effekte („Uebergangs"- und „Folgereaktion") vor uns hätten.

Variationsbewegungen kommen bei Blüten nicht vor, alle Krümmungen beruhen auf ungleich verteiltem Wachstum. Neben epi- und hyponastischen Bewegungen finden wir bei Blütenblättern auch nastische Torsionen und Faltungen.

5b) Andere thermo- und photonastische Erscheinungen. Außer den bisher erwähnten gibt es nun noch eine Reihe anderer thermo- und photonastischer Erscheinungen, die aber bei weitem nicht so eingehend untersucht sind, wie die Schlafbewegungen. So ist z. B. bekannt, daß eine große Reihe von Blütenstielen sich abends krümmen, wodurch die Blüten oder Blütenstände in eine nickende Lage kommen (Beispiele: Oxalis, Geranium, Viola, Tussilago; vgl. Hansgirg 1896). Worauf das beruht, wissen wir nicht. Es braucht sich nicht unbedingt um Nastieen zu handeln, sondern es könnten auch Veränderungen der tropistischen Eigenschaften der betreffenden Organe vorliegen.

Rein thermonastisch sind nach Lidforß (1908) die Krümmungen, die die Blütenstiele von Anemone nemorosa bei niederer Temperatur ausführen, wenn sie um die horizontale Achse des Klinostaten rotieren. Nach Vöchtings Versuchen dürfte sich Anemone stellata ebenso verhalten. Zwingende Gründe dafür sind allerdings noch nicht beigebracht worden, da der Klinostatenversuch noch mehrere Möglichkeiten offen läßt: durch Abkühlung hervorgerufene Induktion einer Dorsiventralität, welche Thermonastie, Photonastie, Geonastie, Autonastie, auch Phototropismus oder Geotropismus zur Folge haben könnte, denn dorsiventrale Organe können am Klinostaten auch tropistisch reagieren (hierüber näheres im nächsten Abschnitt). Aehnliche Deutungen lassen die Fälle zu, welche Vöchting (1898) als Psychroklinie bezeichnet hat und die später durch Lidforß (1903, 1908) vermehrt und näher untersucht worden sind. Es handelt sich darum, daß verschiedene Frühlingspflanzen ihre Sprosse bei niederer Temperatur horizontal stellen, bei höherer aufrichten. Bei dieser Krümmung in die Horizontallage (die als Transversalgeotropismus zu deuten ist) ist ziemlich sicher eine Nastie beteiligt, folglich durch die niedere Temperatur auch eine dorsiventrale Struktur induziert worden. Eine Krümmung findet nämlich bei beliebiger Angriffsrichtung äußerer Kräfte statt. So kann man z. B. die Krümmungsebene in die Horizontale verlegen, wenn man den Sproß so legt, daß die beiden Flanken oben und unten sind. Dann tritt epinastische Krümmung ein, geotropisch kann also die Krümmung nicht sein; ob diese Epinastie allerdings Photo-, Thermo-, Geo- oder Autoepinastie ist, wissen wir nicht. Wir erwähnen diese Fälle hier, weil man, wenn man will, schließlich Krümmungen, die auf einer durch Temperaturänderung hervorgerufenen Stimmungsänderung (gegenüber Licht, Schwerkraft usw.) beruht, Thermonastie nennen kann. In diesem Sinne würde auch durch Licht bewirkte Aenderung des Geotropismus, wie Stahl sie bei Rhizomen beobachtet hat, als Photonastie bezeichnet werden können (vgl. Pfeffer, Pflanzenphysiologie II, 511). Diese Erscheinungen sind schon im vorhergehenden Teil des Artikels („Tropismen", vgl. S. 276) behandelt worden.

Auf einen besonderen Fall von Photoepinastie hat Detmer hingewiesen. Er fand, daß sich die Keimblätter von Cucurbitakeimlingen und die Primärblätter junger Phaseoluspflanzen nicht ausbreiten, wenn die Pflanzen im Dunkeln gehalten werden. Drei- bis fünfstündige Beleuchtung genügt jedoch, um Epinastie zu induzieren, die nach erneuter Verdunkelung eintritt. Wenn wir heute auch Mittel und Wege kennen, die Ausbreitung im Dunkeln zu erzielen (Jost 1895), so ist Vines doch im Unrecht, wenn er bestreitet, daß es sich im Detmerschen Versuch um Photonastie handelt.

Wir beschließen diesen Abschnitt mit der Erwähnung einer photischen Nastie, die dem Typus der Reaktionsnastieen im eigentlichen Sinne angehören dürfte (siehe Einleitung). Es sind das die Schließzellenbewegungen der Spaltöffnungen. Es wird an anderer Stelle auseinandergesetzt, daß der Mechanismus der Spaltöffnungen auf Turgoränderungen beruht (vgl. den Artikel „Gewebe der Pflanzen"). Nimmt der Turgor ab, so erfolgt Schluß, im anderen Falle

Oeffnung der Spalte. Man kann das jederzeit leicht demonstrieren, indem man die Schließzellen plasmolysiert bezw. in erschlafften Schließzellen durch Wasserzufuhr den Turgor erhöht. Uebersehen wir hier die physikalischen Bedingungen einigermaßen, so ist das keineswegs der Fall, wenn wir beobachten, daß die Spaltöffnungen bei Beleuchtung (am Tage) geöffnet, nachts geschlossen sind, wie das tatsächlich bei sehr vielen Pflanzen vorkommt. Das Licht wirkt hier offensichtlich als Reiz, der, vielleicht unter Vermittelung des Plasmas, die osmotischen Substanzen des Zellsafts verändert oder die Durchlässigkeit des Plasmas für verschiedene Stoffe modifiziert. Wir haben keinen Grund anzunehmen, daß die einzelnen Plasmapartien der Schließzelle verschieden empfindlich sind. Die Reaktion (Gestaltveränderung der Schließzelle) beruht also jedenfalls ausschließlich auf dem asymmetrischen Bau der Membran.

6. Andere Nastieen. Wir haben uns nun noch zu fragen, was für weitere Faktoren als auslösende Ursachen nastischer Reizbewegungen in Frage kommen. Wir denken da zunächst an die Feuchtigkeit. Eine nastische Krümmung, die durch Veränderung des Wassergehalts hervorgerufen wird, nennt man Hydronastie. Sie ist wohl zu unterscheiden von den sogenannten hygroskopischen Bewegungen, die sich auf die physikalischen Verhältnisse der Zellmembranen zurückführen lassen und also nicht, wie die Reizbewegungen, an das Leben der Zelle gebunden sind. Ueber Hydronastie ist sehr wenig bekannt. Zwar sind eine ganze Reihe von Fällen beschrieben worden (von C. Kraus, Wiesner, Hansgirg; des letzteren Angaben über die sogenannte „Ombrophobie" der Blüten können auch hierher gezählt werden), aus denen hervorgeht, daß der Wassergehalt und Turgeszenzzustand einen Einfluß auf die Richtung der Organe hat, doch bedürfen alle diese Beobachtungen einer kritischen Nachuntersuchung. Die Blätter von Myriophyllum proserpinacoides scheinen zu hydronastischen Bewegungen befähigt zu sein; wenigstens ist es nicht sehr wahrscheinlich, daß die von Wächter im feuchten Raume nachgewiesenen epinastischen Krümmungen ausschließlich auf ungleich verteilter hydrotropischer Empfindlichkeit beruhen. Eher könnte man schon daran denken, daß durch die Feuchtigkeit die geo- oder phototropische bezw. -nastische Reizbarkeit umgestimmt worden ist.

Wie steht es nun mit der Geonastie? Sicher verbürgte Fälle von Geonastie sind nicht bekannt. Das hat seinen sehr guten Grund. In der Schwerkraft haben wir es ja mit einer Kraft zu tun, die wir zwar in den verschiedensten Richtungen auf Pflanzenorgane wirken lassen, aber niemals entfernen können. Und da es bei nastischen Bewegungen auf die Angriffsrichtung gar nicht ankommt, so können wir eigentlich nie wissen, ob eine Nastie in dem Sinne autonom ist, daß sie auch bei Wegfall der Schwerkraft zustande kommen würde oder ob Geonastie vorliegt. Eine Ausnahme scheinen nur die bereits besprochenen autonomen tagesperiodischen Bewegungen der Phaseolusblätter zu bilden, denn sie hören vermutlich bei gleichmäßiger Rotation um die horizontale Klinostatenachse auf, sich im Tagesrhythmus zu bewegen, da sie von einer Dorsiventralität abhängig sind, die durch einseitige Schwerkraftwirkung induziert und bei diffuser aufgehoben wird. Dagegen gilt obiges z. B. für die Epinastie von verschiedenen Laubblättern, die meist als Autoepinastie angesprochen wird. Wenn man solche Laubblätter (etwa die von Coleus hybridus, Plectranthus fruticosus, Lophospermum scandens) bei Lichtabschluß am Klinostaten beobachtet (Drehung um die horizontale Achse), so sieht man, daß sie sich stark dorsalkonvex krümmen. Bei dieser Krümmung wirken nun verschiedene Faktoren mit: Geotropismus, der deshalb am Klinostaten, also trotz diffuser Schwerewirkung, zum Ausdruck kommt, weil die Blätter ober- und unterseits verschieden empfindlich sind, so daß sich die Wirkungen gegenüberliegender Lagen nicht (wie bei radiären Organen) aufheben — ferner Epinastie. Diese Epinastie kann man isolieren. De Vries hat bereits eine Methode angegeben, die über das Vorhandensein von Epinastie Aufschluß gibt: man legt das Blatt so, daß die Fläche senkrecht steht, die Mittelrippe horizontal liegt. Tritt dann eine Krümmung in der Horizontalebene ein, so kann sie keine geotropische sein, denn das Organ verändert ja dann seine Richtung nicht zum Erdradius, wie das bei jeder geotropischen Reaktion der Fall sein muß (De Vries' Flankenstellungsversuch). Das Versuchsergebnis wird aber bei dieser Anordnung dadurch getrübt, daß tropistische Torsionen eintreten, die die Blattfläche horizontal, mit der Oberseite nach oben, zu richten suchen Diese Torsionen kann man vermeiden, wenn man die Flankenlage in bestimmten Zeitintervallen immer durch Drehung um 180° umkehrt, so daß die zuvor nach oben gekehrte Blatthälfte nun nach unten zu liegen kommt (Kniep). Dann kommt die Epinastie rein zum Ausdruck, und wir haben ein Mittel, zu untersuchen, in welchem Maße sie bei den Krümmungen, die am Klinostaten stattfinden, beteiligt ist.

Ob auch andere dorsiventrale Organe

z. B. zygomorphe Blüten, in dieser Weise epinastisch sind, ist noch nicht bekannt. Noll hat es für Aconitumblüten bestritten, doch lassen sich gegen seine Methodik wesentliche Einwände erheben.

Auf die zahlreichen dorsal- und ventralkonvexen Krümmungen, die sich z. B. bei der Entwickelung von Blättern geltend machen, wollen wir hier nicht eingehen; sie dürften zum großen Teil autonome Nastien sein, doch ist ihre Abhängigkeit von Außenfaktoren noch sehr wenig erforscht. Auch die oscillierenden autonomen Bewegungen wie die der Seitenblättchen von Desmodium gyrans (die zum Teil nastische Torsionen darstellen) würden sich hier anreihen. Ueber sie wird im Artikel „Bewegungen der Pflanzen" berichtet.

Literatur. *Allgemeine, zusammenfassende Werke: vgl. die Literatur zum Abschnitt „Tropismen".*

Zu 1. *(Einleitung).* **Noll**, *Arb. bot. Inst. Würzburg, III, 1885.* — **Pfeffer**, *ebenda, I, 1871.* — **de Vries**, *ebenda, I, 1872.*

Zu 2. *(Seismonastie).* **Baranetzky**, *Flora, 1911, Ergänzungsband.* — **Batalin**, *Flora* 60, *1877.* — **Bert**, *Mém. Société des sc. phys., Bordeaux 1866 und 1870.* — **Borzi**, *Rivista di Scienze Biologiche,* 4, *1899.* — **Bose**, *Plant Response. New York 1906.* — **Brown und Sharp**, *Botanical Gazette,* 49, *1910.* — **Brücke**, *Arch. f. Anat. u. Physiol., 1848 (auch Ostwalds Klassiker d. exakt. Wiss., Nr. 95).* — **Brunn**, *Cohns Beitr. z. Biol. d. Pflanzen,* 9, *1908.* — **Burdon-Sanderson**, *Proceedings of the Roy. Soc. London,* 21, *1873.* — **Derselbe**, *Philosophical Transactions of the Roy. Soc. London,* 173, *1882 und* 179, *1888.* — **Derselbe**, *Biolog. Zentralblatt* 2, *1882 und* 9, *1889.* — **Burdon-Sanderson and Page**, *Proc. of the Roy. Soc. London,* 25, *1877.* — **Covolo**, *Discorso della irritabilità d'alcuni fiori serovamente scoperta. Florenz 1764.* — **Cunningham**, *Annals of the Royal botanical Garden Calcutta,* 6, *1895.* — **Ch. Darwin**, *Insektenfressende Pflanzen. Deutsch von V. Carus, 2. Aufl., 1899.* — **Derselbe**, *Kreuz- und Selbstbefruchtung im Pflanzenreiche. Deutsch von V. Carus, 2. Aufl., 1899.* — **Dassen**, *Naturkund. Verh. v. d. Hollandsche Maatschappij d. Wetensch. de Harlem, 1835.* — **Dutrochet**, *Rech. anat. et physiol. sur la Structure intime des Animaux et des Végétaux, Paris 1824, Sect. II.* — **Derselbe**, *Mém. p. servir à l'Hist. anat. et physiol. des Végétaux et des Animaux, Paris 1837.* — **Fitting**, *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 39, *1904.* — **Derselbe**, *Die Reizleitungsvorgänge bei den Pflanzen. Erg. d. Physiol.,* 4 *und* 5, *1906/07 (auch separat erschienen).* — **Gardiner**, *Arb. bot. Inst. Würzburg,* 3, *1884.* — **Haberlandt**, *Das Reizleitungssystem der Sinnpflanze, Leipzig 1890.* — **Derselbe**, *Ann. du jardin bot. de Buitenzorg, 2. Suppl., 1898.* — **Derselbe**, *Sinnesorgane im Pflanzenreich zur Perzeption mechanischer Reize, 2. Aufl., 1906.* — **Hansgirg**, *Bot. Centralbl.,* 43, *1890.* — **Derselbe**, *Physiologische und phykophytologische Untersuchungen, Prag 1893.* — **Derselbe**, *Sitzungsber. d. Kgl. böhm. Ges. d. Wiss., Prag 1896.* — **Juel**, *Bot. Studier till. Kjellman, Upsala 1906.* — **Kitchener**, *A Years Botany, 1874.* — **L. Linsbauer**, *Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wiss. Wien. Math.-naturw. Klasse,* 104, *Abt. I, 1905.* — **Derselbe**, *Wiesnerfestschrift, Wien 1908.* — **L. und K. Linsbauer**, *Sitzungsber. d. Wien. Akad. d. Wiss. Math.-naturw. Klasse,* 115, *Abt. I, 1906.* — **Lutz**, *Zeitschr. f. Botanik,* 3, *1903.* — **Mac Dougal**, *Bot. Gazette,* 23, *1897.* — **Macfarlane**, *Contributions from the Botanical Laboratory Univ. of Pennsylvania,* 1, *1897.* — **Meyen**, *Pflanzenphysiologie, 1839.* — **Munk**, *Arch. f. Anat., Physiol. u. wiss. Medizin, herausg. v. Reichert u. Du Bois-Reymond. 1876 (auch separat als: Die elektrischen und Bewegungserscheinungen am Blatte der Dionaea muscipula, Leipzig 1876).* — **Nernst**, *Pflügers Archiv* 122, *1908.* — **Oliver**, *Ber. d. deutsch. bot. Gesellsch., 1887 und Annals of Botany I, 1887.* — **Pfeffer**, *Physiologische Untersuchungen, Leipzig 1873 (a).* — **Derselbe**, *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 9, *1873.* — **Derselbe**, *Unters. d. bot. Inst. Tübingen,* 1, *Heft IV, 1885.* — **Sachs**, *Flora,* 46, *1863.* — **Steinach**, *Pflügers Archiv,* 125, *1908.*

Zu 3. *(Haptonastie).* **Batalin**, *Flora, 60, 1877.* — **Ch. Darwin**, *Insektenfressende Pflanzen. Deutsch von V. Carus, 2. Aufl., 1899.* — **Fitting**, *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 38, *1903 und* 39, *1904.*

Zu 4. *(Chemonastie).* **Correns**, *Botan. Zeitg.,* 54, *1896.* — **Ch. Darwin**, *Insektenfressende Pflanzen. Deutsch von V. Carus, 2. Aufl., 1899.* — **Macfarlane**, *Contrib. from. the Bot. Lab. Univ. of Pennsylvania,* 1, *1897.* — **Wächter**, *Ber. d. deutsch. bot. Gesellsch.,* 23, *1905.*

Zu 5. *(Thermo- und Photonastie — Nyktinastie).* **Benecke**, *Zeitschr. f. Bot.,* 1, *1909.* — **Brown and Sharp**, *Bot. Gaz.,* 49, *1910.* — **Correns**, *Botan. Zeitg.,* 54, *1896.* — **Ch. Darwin**, *Insektenfressende Pflanzen. Deutsch von V. Carus, 2. Aufl., 1899.* — **Derselbe**, *Das Bewegungsvermögen der Pflanzen. Deutsch von V. Carus, 2. Aufl., 1899.* — **A. P. de Candolle**, *Mém. présentés à l'Institut des Sciences par divers Savants,* 1, *1805.* — **Derselbe**, *Pflanzenphysiologie. Deutsch von Röper,* 2, *1835.* — **Detmer**, *Botan. Zeitg.,* 40, *1882.* — **A. Fischer**, *Botan. Zeitg.,* 48, *1890.* — **Hansgirg**, *Physiologische und phykophytologische Untersuchungen Prag 1893.* — **Derselbe**, *Sitzungsber. d. kgl. böhm. Ges. d. Wiss., Prag 1896.* — **Jost**, *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 27, *1895 und* 31, *1898.* — **Derselbe**, *Bot. Zeitg.,* 35, *1897.* — **Košanin**, *Einfluß von Temperatur und Aetherdampf auf die Lage der Laubblätter. Dissertation. Leipzig 1905.* — **Lidforss**, *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 38, *1903.* — **Derselbe**, *Weitere Beiträge zur Kenntnis der Psychroklinie, Lund 1908.* — **Macfarlane**, *Contrib. from the Bot. Lab. Univ. of Pennsylvania,* 1, *1877.* — **Oltmanns**, *Botan. Zeitung,* 53, *1895.* — **Pfeffer**, *Physiologische Untersuchungen, Leipzig 1873.* — **Derselbe**, *Die periodischen Bewegungen der Blattorgane, ebenda, 1875.* — **Derselbe**, *Entstehung der Schlafbewegungen, ebenda, 1907.* — **Derselbe**, *Der Einfluß mechanischer Hemmung und von Belastung auf die Schlafbewegungen, ebenda, 1911.* — **Royer**, *Annales d. scienc. nat., 5. série, 9, 1868.* — **Schilling**, *Der Einfluß der Be-*

wegungshemmungen auf die Arbeitsleistungen der Blattgelenke von Mimosa pudica, 1895. — **Schwendener,** *Sitzungsber. d. kgl. Akad. d. Wiss. Berlin, 1897.* — **Stahl,** *Ber. d. deutsch. bot. Gesellsch.,* 2, *1884.* — **Derselbe,** *Botan. Zeitg.,* 55, *1897.* — **Stoppel,** *Zeitschr. f. Botanik,* 2, *1910.* — **Dieselbe,** *Ber. d. deutsch. botan. Gesellsch.,* 30, *1912.* — **Stoppel und Kniep,** *Zeitschr. f. Botanik,* 3, *1911.* — **Vines,** *Annals of Botany,* 3, *1889.* — **Vöchting,** *Jahrb. f. wiss. Botanik,* 21, *1890.* — **Derselbe,** *Ber. d. deutsch. botan. Gesellsch.,* 16, *1898.*

Zu 6. (Andere Nastien). **Hansgirg,** *Physiologische und phykophytologische Untersuchungen, Prag 1893.* — **Derselbe,** *Sitzungsber. d. kgl. böhm. Gesellsch. d. Wissensch., 1896.* — **Kniep,** *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 48, *1910.* — **C. Kraus,** *Flora 1879.* — **Noll,** *Ueber heterogene Induktion, Leipzig 1892.* — **Derselbe,** *Flora* 77, *1892.* — **de Vries,** *Arb. d. bot. Inst., Würzburg, I, 1872.* — **Wächter,** *Jahrb. f. wiss. Bot.,* 46, *1909.* — **Wiesner,** *Sitzungsber. d. Wiener Akad. Math.-naturw. Klasse,* 86, *Abt. I, 1882.*

K. Kniep.

Reliktenseen.

Tümpel von Meerwasser, welche in Vertiefungen eines durch Hebung trocken gelegten, zum Festlande gewandelten Meeresgrundes stehen blieben und allmählich der Aussüßung anheimfielen, ohne ihre marine Fauna gänzlich einzubüßen (vgl. den Artikel „Seen").

Remak
Robert.

Geboren am 26. Juli 1815 zu Posen, gestorben am 29. August 1865 in Kissingen. Er studierte in Berlin unter Johannes Müller und Schönlein Medizin. Vor allem beschäftigte er sich sehr eingehend mit mikroskopisch-entwickelungsgeschichtlichen Forschungen. 1847 wurde ihm durch eine besondere Kabinettsorder Friedrich Wilhelms IV. erlaubt, sich als erster jüdischer Dozent an der Universität Berlin zu habilitieren, 1859 wurde er außerordentlicher Professor. — Remak hat vor allem auf dem Gebiete der Embryologie und Histologie bahnbrechend und fördernd gewirkt, besonders für letztere ist er als der eigentliche Begründer anzusehen. Hervorzuheben sind seine Untersuchungen über den feineren Bau der Nerven und über die Entwickelungsgeschichte der Wirbeltiere. Remak schloß sich der Schultzschen Protoplasmatheorie an, die im Anschluß an F. Dujardin im Urschleim oder Protoplasma den Träger des Lebens sieht, um von diesem neuen Standpunkt aus die embryonale Entwickelung zu erforschen und zu klären. Ihm gebührt auch das Verdienst, die Chemie in ausgiebiger Weise in den Dienst der Entwickelungsgeschichte gestellt zu haben. Durch ihn erfuhr so die Lehre von den Geweben, die Histologie, eine Erweiterung zur Lehre von den Zellen (Zytologie). Die Einheit von Bau und Entwickelung des Organismus wurde von ihm klar erkannt und mit realen Unterlagen versehen, wo noch früher die Spekulation erfolglos gesucht hatte.

In der Medizin hat sich Remak zum erstenmal des galvanischen Stromes zur Heilung von Nervenkrankheiten bedient.

Seine bedeutendsten Schriften sind: „Ueber ein selbständiges Darmnervensystem" (Berlin 1847). „Untersuchungen über die Entwickelung der Wirbeltiere" (2 Tle., Berlin 1851 bis 1855). „Ueber methodische Elektrisierung gelähmter Muskeln" (12. Aufl., Berlin 1856). „Galvanotherapie bei Nerven- und Muskelkrankheiten" (Berlin 1858, französisch Paris 1860).

Literatur. *Biographisches Lexikon hervorragender Aerzte, Bd. IV, S. 702.* — *Allgemeine deutsche Biographie, Bd.* 28, *1889.* — **Burckhardt,** *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Reptilia.

1. Die Klasse Reptilia. 2. Morphologie und Physiologie: a) Körperform. b) Hüllhaut (Integument). c) Skelett. d) Muskulatur. e) Nervensystem. f) Sinnesorgane. g) Mundhöhle und Darmkanal. h) Atemorgane. i) Blutgefäßsystem, Kreislauforgane. k) Lymphgefäßsystem. l) Harn- und Geschlechtsorgane. m) Männliche Begattungsorgane. n) Geschlechtsunterschiede. 3. Geschlechtsprodukte und Embryologie. 4. Systematik und Phylogenie.

1. Die Klasse Reptilia. Zu den Reptilien gehören folgende, zur Zeit noch lebende, bekannte Tierformen: Krokodile, Schildkröten, Eidechsen und Schlangen; diese bilden nach Hinzufügung der Hatteria die typischen Vertreter der fünf, zur Zeit noch lebenden Reptilien-Ordnungen: Crocodilia, Chelonia, Sauria, Ophidia und Rhynchocephalia.

Bei jedem Reptil sind die nachfolgenden Bestimmungscharaktere stets vereinigt zu finden: Es sind Wirbeltiere ohne für aktives Leben genügende eigene Blutwärme (Kaltblüter); sie atmen durch Lungen; sie haben einen einheitlichen, in der Körpersymmetrieebene liegenden Knochenknopf als Hinterhauptscondylus; rote Blutkörperchen mit Kern; und vollständigen rechten und linken Aortenbogen.

Die Reptilienhauptcharaktere aber sind die folgenden: Das Skelett ist vollständig verknöchert. Das Hinterhaupt hat für die Wirbelsäule einen einheitlichen Knopf als Gelenkkopf, der hauptsächlich durch das Suboccipitale gebildet wird. Der Unterkiefer besteht aus mehreren Knochen und gelenkt mit dem Schädel durch das Quadratbein. Das Gehörknöchelchen Columella (Stapes) paßt in die Fenestra ovalis. Die Gliedmaßen haben tetrapoden

Fünfzehertypus. Der Nervus hypoglossus kommt aus der Schädelkapsel. Die Rippen gelenken mit einem wirklichen Brustbein. Die Hüftgelenkpfanne liegt vor oder unter dem Kreuzbein (nicht hinter demselben, wie bei Säugern). Die Haut ist drüsenarm und entweder nackt oder mit Schildern bedeckt, nicht dagegen mit Federn noch Haaren. Die Reptilien gehören zu den wechselwarmen Tieren (Kaltblüter). Ihre roten Blutkörperchen sind bikonkav, oval und gekernt. Das Herz hat eine doppelte Vorkammer und eine unvollkommen zweigeteilte Herzkammer; es hat keinen Conus arteriosus; aber halbmondförmige Klappen bestehen bei ihm an der Basis der dreiteiligen Aortenwurzel. Rechter und linker Aortenbogen sind vollausgebildet und funktionieren. Ausschließliche Lungenatmung; Kiemen fehlen selbst den Embryonen. Seitenorgane sind nicht in der Haut vorhanden. Die Nieren haben keine Nierentrichter (Nephrostomen). Jede Niere hat einen eigenen Ureter. Eine typische Cloake ist stets vorhanden. Die Eier sind meroblastisch. Es findet innere Befruchtung statt, und wird durch männliche Copulationsorgane bewirkt, mit Ausnahme von Hatteria. Während der Embryonalentwicklung treten Amnion und Allantois in Tätigkeit.

Als Tiere mit ganz einheitlichem Hinterhauptscondylus; mit Nervus hypoglossus, der aus der Schädelkapsel kommt; mit Rippen, die einem wirklichen Sternum ansitzen; weil ihnen Kiemen fehlen; ihre Nieren keine Nierentrichter besitzen; die Eier meroblastisch sind, und weil Amnion und Allantois bei ihnen auftreten, unterscheiden sich die Reptilien von den Amphibien. — Als nicht mit Haaren noch Federn bedeckte, hautdrüsenarme, wechselwarme, mit mangelhafter Trennung der Herzkammern und rechtem und linkem Aortenbogen versehene Wirbeltiere unterscheiden sie sich von Vögeln und Säugetieren. Von den Säugetieren speziell auch noch deshalb, weil ihr Unterkiefer aus mehreren Knochen besteht und mittels Quadratum am Schädel gelenkt, weil ihre Hüftgelenkpfanne nicht hinter dem Ilio-sacral-Gelenk liegt, und weil ihre roten Blutkörperchen kernhaltig, bikonkav und oval sind.

Blainville (1816) und Merrem (1820) sonderten zuerst die Reptilien als gleichwertige Klasse von den Amphibien ab, dann trennte man in der Klasse selbst die Krokodile und Eidechsen als Ordnungen, und erhob auch Hatteria nebst paläontologischen Verwandten zu Ordnungsrang. Stannius schied ferner die lebenden Reptilien in solche mit unbeweglichem Quadratbein (Schildkröten und Krokodile) und mit beweglichem Quadratbein (Eidechsen und Schlangen); Osborn dagegen die noch lebenden nebst den ausgestorbenen nach dem Besitz von 1 oder 2 Schläfenbögen in 2 Unterklassen, die Synapsida und Diapsida.

Andere unterscheiden zwischen Plagiotremen (Queraftrigen) und Längsaftrigen; oder zwischen Schuppensauriern (Lepidosauriern = Squamata) und Hydrosauriern (Schildkröten und Krokodile). Alle derartigen Einteilungsversuche haben aber durchaus keinen wirklichen d. h. phylogenetischen Wert, da sie sich durchweg nur auf Konvergenzcharaktere und nicht Homologien stützen. Andere wieder sehen sogar schon darin ein großes eigenes Verdienst, wenn sie alle Reptilien-Ordnungen zu Unterklassen erheben; oder wenn sie möglichst viele Familien zu Unterordnungen ernennen.

Von den 10 bis 11 Ordnungen, in welche die Reptilien zurzeit am besten eingeteilt werden, haben 5 noch lebende Vertreter, nämlich: Rhynchocephalia, Sauria, Chelonia, Crocodilia, Ophidia.

2. Morphologie und Physiologie.

2a) Körperform. Rhynchocephalia, Crocodilia und Sauria, soweit letztere vierfüßig sind, schließen sich in Körperbau und Bewegungsart den Amphibien unmittelbar an. Viele Saurier und alle Schlangen zeigen extreme Körperstreckung bei starker Rückbildung der Gliedmaßen bis zu völligem Schwund, und bewegen sich dann durch Rumpfschlängelung in der Horizontalen oder Vertikalen. Die Körperstreckung kann dabei allein dem Schwanz (Eidechsenfamilie: Pygopodidae); oder nur dem Rumpf (Eidechsenfamilie: Anelytropidae; Schlangen zumeist); oder Rumpf und Schwanz gleichmäßig zukommen. Die Eidechsenfamilie Anguidae und -gattung Lygosoma zeigen alle Zwischenformen zwischen vierfüßigen Tieren und extrem gestreckten, ganz fußlosen. — Die Schildkröten besitzen extreme Starrheit im plumpen Rumpf, in dessen Seitenfurchen sie zum Schutz Kopf, Gliedmaßen und Schwanz unterbringen können; ihre Bewegungsart geschieht aber trotzdem genau oder etwas modifiziert nach dem Typus aller vierfüßigen Reptilien: Bewegung der Oberarme und Oberschenkel in der Horizontalen beim Gehen usw.

2b) Die Hüllhaut (Integument). Die Hüllhaut der Reptilien ist (im Gegensatz zu der Amphibienhüllhaut) als Anpassung an den Luftaufenthalt des Trägers derb, trocken, unfähig zur Hautatmung, drüsenlos oder -arm, und besteht aus zwei Lagen: obere Lage (ektodermalen Ursprungs) Oberhaut (Hornhaut, Epidermis), untere Lage (mesodermal entstanden) Lederhaut (Cutis, Corium). Die Oberhaut besteht aus 3 Zonen: 1. Untere oder Keimzone (Stratum germinativum oder Malpighii), 2. Zwischenzone, und 3. Hornzone (Stratum corneum), die noch von einer Ausscheidung der Hornzone: Oberhäutchen (Cuticula) über-

deckt wird. Die Keimzone erzeugt die Zellen der Hornzone, die unter Kernverlust absterbend verhornen; und bei Eidechsen und Schlangen periodisch — während der Häutung — abgeworfen werden, entweder in Stücken oder vom ganzen Körper zusammenhängend (Schlangenhemd); bei , Schildkröten und Krokodilen aber nicht, oder bei einigen Schildkröten noch stellenweise; das Hinzuwachsende verdickt hier die Hornzone der Haut.

In der Lederhaut kreuzen sich rechtwinklig senk- und wagrecht verlaufende Bindegewebsfasern. Sie selbst aber stützt durch Erhebungen ihrer Oberfläche (Papillen) die Hornhaut (pars papillaris). Diese Papillen sind Grundlagen für zahlreiche Spezial- oder Sondergebilde der Haut; nach zweifacher Art: Sie selbst können zu ansehnlicher Größe auswachsen, und die über ihnen liegende Hornschichtstelle wächst mit und verhornt darauf besonders stark. Solche Horngebilde sind die Hornscheiden der Kiefer der Schildkröten; dann die Hornscheiden der Chamaeleonhörner, die (analog den Wiederkäuerhörnern) auf knöchernen Stirn- oder Nasenzapfen sitzen (Cham. montum hat 2; oweni 3; quadricornis 4); dann die Eischwiele auf der Schnauzenspitze der Schildkröten- und Krokodil-Embryonen (zerschlitzt die Eischale und gestattet so dem reifen Embryo das Auskriechen aus der Schale); Horngebilde sind ferner die Krallen an den Finger- und Zehenspitzen. Sie bestehen aus Krallensohle, Krallendach oder -platte, und Krallenwall, der als Hautfalte unter Falzbildung die Krallenwurzel umfaßt und bei Schildkröten nur oben, bei Krokodilen rings um die Zehen vorhanden ist. Die Krallen der Eidechsen sind stark seitlich zusammengedrückt; die der Krokodile fast rund im Querschnitt; die vieler Schildkröten platt, nagelartig. — Mehr oder weniger über die ganze Hüllhaut verbreitet sind ferner Horngebilde als Körperschuppen. Entweder als kleine Erhebungen (Körnerschuppen: Chamaeleon vulgaris), oder als größere Höcker (Tuberkeln), oder flach und sich dann zumeist mehr oder weniger deckend (Schuppen: bei vielen Eidechsen und den meisten Schlangen; bei beiden die Schuppen auch oft noch ein- bis vielkielig). Größere Horngebilde heißen Schilder: Kopf- und Bauchschilder vieler Schlangen und Eidechsen; Bauch- und Rückenschilder der Krokodile und meisten Schildkröten. Zumeist haben sie Sonderform, -lage und -ausbildung (für die Artbestimmung daher sehr wichtig) und stoßen im Maximum fest aneinander. Bei Schildkröten heißen sie nach der Lage auf dem Rücken: Nackendeckschild, Wirbel-, Rippen-, Rand- und Schwanzdeckschilder; und am Bauch: Kehlmitten-(Intergular-), Kehlseiten-(Gular-), Schulter-, Brust-, Bauch-, Schenkel- und Afterdeckschilder, Brücken-, Achsel- und Randschilder. Den Schildkröten Trionychidae und Carettochelys fehlen die Hautschilder; Sphargis hat zahlreiche kleine.

Die Hautpapillen der Reptilienhüllhaut können ferner verknöchern und so zur Entstehung von Hautknochen und Hautskelett Veranlassung geben. Derartige Hautknochen können ohne Beziehung zu Spezialgebilden der Oberhaut stehen, oder direkt oder indirekt zu ihnen Beziehung haben. Als von der Oberhaut unbedeckte Hautknochen, die in den Mund einwanderten, gelten (fälschlich, Trn; denn sie sind Verknöcherungen in der Munddarmwand) die Zähne im Gebiß der Eidechsen, Schlangen, Krokodile und Hatteria, die den Schildkröten fehlen. — In der Hüllhaut der Reptilien selbst aber sind Hautknochen sehr häufig als kleine Plättchen, die oft in Gruppen aneinander liegen (z. B. im „Supraorbitalknochen" der Tarentola mauretanica, bei Lacerta in der Schläfen- und Jugalgegend, bei Anguis und Scinciden den ganzen Körper einhüllend). Die Hornschuppen, die oft darüber liegen, folgen dann entweder dem gleichen Entstehungsmodus, d. h. bedecken sie genau (so im Rückenpanzer der Krokodile), oder nicht (Knochenplatten und Hornschilder des Schildkrötenrumpfs). Das Bauchsternum der Krokodile und Hatteria gehört dagegen (trotz Gegenbaur und Wiedersheim) nicht zu den Hautknochen, sondern zum Binnenskelett (Beweis: Beim Kaiman kommen beide selbständig nebeneinander vor, usw.).

Die mächtigsten Hautknochenplatten sind den Schildkröten eigen, sie bilden hier

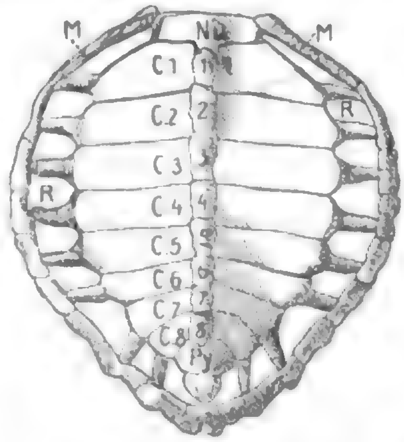


Fig. 1. Chelone mydas. Rückenschild von oben. Nu Nuchal- oder Nackendeckplatte, 1 bis 8 Neural- oder Wirbeldeckplatten, C_1 bis $_8$ Costal- oder Rippendeckplatten, M Marginal- oder Randdeckplatten, R Rippen. Aus v. Zittel und Broili.

fest aneinanderstoßend, einen Rücken- und Bauchschild, die in der Brücke sich berühren oder verwachsen. Im Maximum bestehen

beide Schilde aus nur ganz wenigen, mächtig großen Platten (bei Sphargis dagegen aus sehr vielen kleinen Knochenplättchen der Hüllhaut); der Bauchschild (Plastron) hat nämlich im Höhepunkt der Ausbildung nur 9 (Fig. 2): Vorn aneinanderstoßend die 2 Epiplastra, zwischen ihnen das Entoplastron, nach hinten folgen je 2 Hyo-, Hypo-, Xiphiplastra und eventuell mehrere Brückenplatten. Der Rückenschild (Carapax) weist in der Höhe der Ausbildung (Fig. 1) Nacken-, Wirbel-, Rippen-, Rand- und zwei hintereinander liegende Schwanzdeckplatten auf. Randplatten fehlen Sphargis und Cyclanorbis; Wirbeldeckplatten: Platemys und Chelodina, wo die Rippendeck-

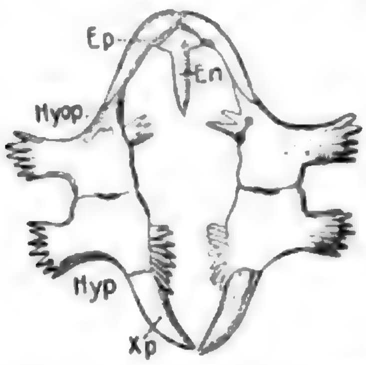


Fig. 2. **Chelone mydas.** Bauchschild von unten. En Entoplastron, Ep Epiplastron, Hyo Hyoplastron, Hyp Hypoplastron, Xp Xiphiplastron. Brückenplatten fehlen diesem Tier.

platten der beiden Körperseiten deshalb oben in der Mittellinie des Tieres aneinanderstoßen. Nach **Gegenbaur** und **Wiedersheim** — gegenüber **Gadows** richtiger Deutung — sind vom Rückenschild nur Nacken-, Schwanz- und Randdeckplatten wirklich Hautplatten, die Brust- und Wirbeldeckplatten seien dagegen durch Verbreiterung der Rippen und Wirbeldornfortsätze entstanden; dagegen spricht Sphargis, wo die Rückenhautknochenplatten neben unveränderten Rippen und Wirbeldornen vorhanden sind. Nach **Gegenbaur** sind ferner die Bauchschildplatten sämtlich Hautknochen; nach **Gadows** — sicher nicht berechtigter — Annahme zum größten Teil homolog den Schultergürtelelementen und den Bauchrippen anderer Reptilien: Episternum = Entoplastron; und Claviculae = Epiplastrae. — Sonstige Hautsondergebilde der Reptilien sind: Die hautfarbstofftragenden Zellen, die Chromatophoren, die nach der Färbung als Melano-, Erythro- und Leukophoren, nach der Lagerung als Chromatophoren und Schirm- oder Interferenzzellen unterschieden werden; sie sind aber alle morphologisch und physiologisch gleichartig und nur durch Größen- oder Entwicklungsstufen unterschieden (**Tornier**, Kriechtiere Deutsch-Ost-Afrikas 1897, ausführliche Besprechung). Es sind fast immer strahlige Hüllhautzellen, mit festliegenden Zellwandungen, deren im Zellbionten liegendes Pigment unter Nerveneinfluß in anscheinend vorgezeichneten Bahnen mit dem Zellbionten zusammengezogen und auseinandergetrieben werden kann. Sie erzeugen so, allein liegend, oder durch Neben- und Ueberlagerung sämtliche Hüllhautfarben der Reptilien (soweit diese nicht durch Brechung des Lichts in und an der Haut als Schillerfarben erzeugt werden); und zwar: Schwarz, Rot und Gelb durch Alleinliegen: Blau durch Ueberlagerung von farblosen oder durch Kontraktion farblos erscheinenden über schwarze; Grün durch Ueberlagerung von gelben über schwarze. An der Grenze zwischen Ober- und Lederhaut ist ihre Hauptansammlung (stratum pigmentosum). Durch intensiven Farbwechsel sind ausgezeichnet: Chamaeleon, Calotes, Anolis, Uromastix Lygodactylus picturatus usw. — An Drüsen ist die Reptilienhaut sehr arm. Bei vielen Sauriern steigen solche als Präanalporen (After- und Schenkelporen) in einer (Lacerta) oder zwei Reihen (Agama-Arten und Metapoceros) dicht vor dem After (und häufig auf die Oberschenkelunterseiten fortgesetzt) aus der Unterhaut als schlauchartig verzweigte Hohlräume auf, deren Inneres mit verhornten Epidermiszellen angefüllt ist, die auch als feste Masse aus der Mündung des Schlauches über die Hautoberfläche emporragen. Häufig nur bei Männchen vorhanden. Funktion unbekannt. — Bei Krokodilen an jeder Kopfseite je zwei, unter Muskeleinfluß ausstülpbare Moschusdrüsen vorhanden; und am Rücken ferner — vom Nacken bis zur Schwanzwurzel verteilt — auf der Grenze zwischen erster und zweiter Schuppenreihe ca. 20 kleine Drüsensäckchen (**Voeltzkow**, **Giacomini**). Bei Wasserschildkröten (Emys) Moschusdrüsen an den Verbindungsstellen des Rücken- und Bauchschildes (**Peters**).

2c) **Skelett.** *a*) **Schädel.** Vom Reptilienschädel (Fig. 3—5) wird nur ein geringer Teil knorplig vorgebildet, doch bleiben andererseits in ihm im Nasengebiet, zwischen den Augen, und dahinter in der Schläfengegend Teile für Lebenszeit knorplig. Die Schädelbasis, bei Amphibien noch gerad linig, erfährt hier eine Knickung in der Augengegend, so daß bei gleicher Hinterhauptseinstellung die Reptilienschnauzenspitze schräg nach unten schaut. In der Hinterhauptsregion ferner gehen die Reptilien durch Erwerbung eines Supraoccipitale über die Amphibien hinaus. Der Hinterhauptshöcker (Condylus occipitalis) ist ein einheitlicher, unpaarer Gelenkknopf (monokondyler Typ; Gegensatz Amphibien und Säuger); er kann nierenförmig, halbmondförmig und (häufiger) dreilappig sein;

steht gewöhnlich rein nach hinten, bei Krokodilen aber leicht abwärts geneigt; wird gebildet entweder allein vom Suboccipitale (Basioccipitale), oder mit Hilfe der Latroccipitalen. Temporalgegend) ist häufig nur häutig oder knorpelig; und dann darin das Ali- und Orbitosphenoid (Krokodile) als winzige Knöchelchen. Bei den Schlangen dagegen

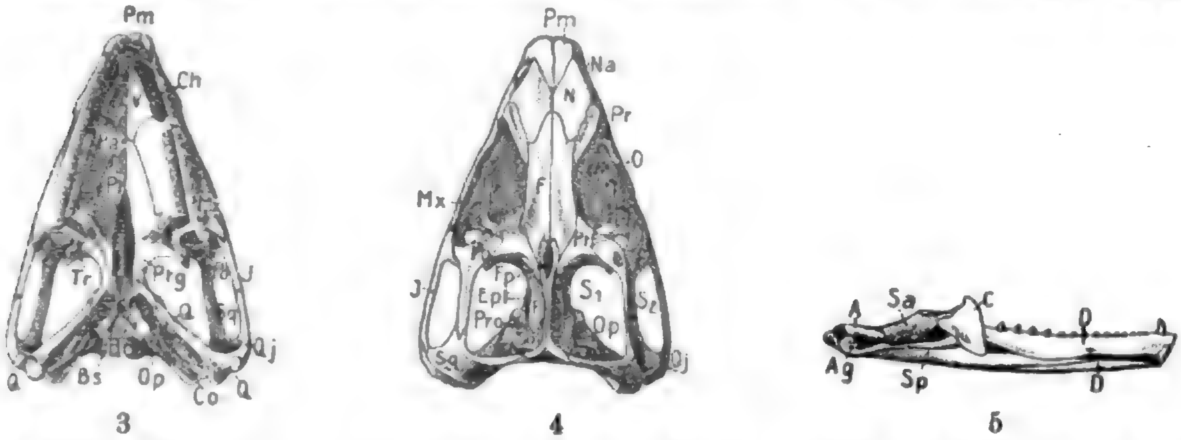


Fig. 3 bis 5. Schädel von Hatteria punctata. Fig. 3. Schädel von oben, 4 von unten, 5 Unterkiefer von innen. A Articulare, Ag Angulare, Bo Suboccipitale, Bs Basisphenoid mit Parasphenoid, C Complementare mit Coronoidfortsatz, Ch Innere Naslöcher (Choanen), Co Auriscolumella, D Dentale, Ept Craniicolumella (Epipterygoid), F Frontale, Fp Foramen parietale, J Jugale, L Lacrymale, Mx Maxillare, N Nasale, Na äußere Naslöcher, O Augenhöhle, Op Opisthoticum, P Parietale, Pa Palatinum, Pm Prämaxillare, Po Postorbitale, Pr Präfrontale, Pro Prooticum, Ptf Postfrontale, Ptg Pterygoid, Q Quadratum, Qj Quadratojugale, Sa Supraangulare, So Supraoccipitale, Sp Spleniale (Operculare), Sq Squamosum, St Supratemporale, Tr Transversum, S_1, S_2 obere und untere Schläfenöffnung, V Vomer. Nach Siebenrock aus v. Zittel und Broili.

Von den Gehörkapselknochen ist Prooticum (Petrosum) stets selbständig; Opisthoticum (Paroccipitale) verschmilzt häufig mit Latroccipitale; bei Schildkröten aber nicht. Epioticum noch nicht nachgewiesen. Die Gehörkapsel ist besonders im Labyrinthteil kleiner als bei Amphibien; das Gehirn ist stärker entwickelt. Fenestra ovalis ist vorhanden; dazu kommt die Fenestra rotunda, durch Membran verschlossen, hier neu hinzu. Als Gehörknöchelchen ist der Steigbügel (stapes) vorhanden (= Columella + operculum der Amphibien); dazu noch eine Extracolumella knorpelig im Trommelfell. Die eustachische Röhre verbindet Pauken- und Rachenhöhle. — Da die 3 Wurzeln des Nervus hypoglossus hier nicht zwischen den 3 ersten Halswirbeln liegen, sondern aus der Gehirnkapsel entspringen (wie bei Säugern und Vögeln; Gegensatz: Amphibien), nimmt E. Gaupp an, daß im Hinterhaupt der Reptilien 3 Halswirbel der Amphibien mitenthalten seien (richtiger ist, daß der Nerv bei den Reptilien in die Schädelkapsel eingewandert ist, und an seiner früheren Stelle durch 3 Spinalnerven ersetzt wurde, Trn.). — Das Basisphenoid läuft nach vorn in einen spitzen Fortsatz aus (Rostrum; = Präsphenoid + Parasphenoid der Embryonen von Emys, Podocnemis und anderer Reptilien). Das Parasphenoid bleibt aber noch selbständig bei der Schildkröte Dermochelys (J. Versluys). — Die Schädelbezirke zwischen und hinter den Augen (Augenscheidewand = Interorbitalseptum, und ist die Temporalgegend durch Fortsätze vom Parietale und Frontale völlig überknöchert (Rathke). Die Augenscheidewand aller Reptilien ist außerdem durch die groß angelegten Augäpfel stark zusammengedrückt; daher ist der Schädel kielbasisch (tropibasisch, Gaupp) wie bei Vögeln und Säugetieren, im Gegensatz zu den lebenden Amphibien. In dem Schädelraum über den Augen liegen nur die Bulbi olfactorii und die Riechnerven. — Die Augenhöhle der Reptilien ist zumeist von Knochen ganz umschlossen (Ausnahme Geckonen, Schlangen). Die Umrahmung können bilden: Supraorbitale (bei Eidechsen), Postfrontale (2: bei Anguis), Postorbitale (Hatteria, Schildkröten), Jugale, Maxillare, und Praefrontale (= Lacrymale, oder Adlacrymale, Gaupp).

Die Parietalia verwachsen bei den Schlangen; und nur bei den Eidechsen und Hatteria ist darin oder zwischen ihnen ein großes Foramen parietale, in welches ein drittes Auge eingelagert ist. Frontalia verwachsen beim Varan, ebenso Nasalia. Die Nasalia fehlen den Schildkröten, sie werden ersetzt durch die oben vor den Frontalien in der Schädelmittellinie zusammenstoßenden Praefrontalia. Die Praemaxillaria sind bei den meisten Eidechsen und der Schildkröte Chelys verwachsen; dagegen ist Vomer bei Schlangen und Eidechsen paarig. — Palatoquadratum erleidet Rückbildung bei manchen Eidechsen und den Schlangen; stets dagegen ist vorhanden ein Quadratum. Dasselbe, mehr oder weniger beweglich, bei sämtlichen Eid-

echsen und Schlangen (Streptostylica) [bei Schlangen auch das damit verbundene Squamosum (Fig. 9); und da beide Knochen außerdem bei Schlangen nach hinten den Schädel überragen, und die Unterkieferäste nicht verwachsen sind, ist das Schlangenmaul gewaltig aufreißbar]; bei Hatteria, Krokodilen und Schildkröten ist das Quadratum hingegen unbeweglich durch das Squamosum mit der Schädelkapsel vereinigt (Monimostylica). Zwischen Squamosum und Parietale ist bei manchen Reptilien ein Supratemporale eingeschoben.

Den meisten Reptilien eigentümlich ist eine Columella cranii (Epipterygoid, Gaupp), die senkrecht vom Pterygoid zum Parietale zieht, und selbständig verknöcherten Ast des Palatoquadrats darstellt. Ebenso charakteristisch für viele ist auch ein Os transversum, welches Pterygoid mit Maxillare verbindet (Schlangen, Eidechsen, Krokodile), und bei Schildkröten wahrscheinlich mit dem Pterygoid verwächst. — Die Schläfengegend der Reptilien ist nach sechsfachem Typus gebaut (Fig. 6—10): 1. Sie ist von Knochen nicht bedeckt (Schlangen; einige Eidechsen und Schildkröten). 2. Es ist ein unterer Schläfenbogen aus Maxillare, Jugale und Quadratojugale gebildet, und darüber dann eine einzige Schläfengrube (einige Schildkröten, wie Amphibien). 3. Diese Schläfengrube wird durch einen zweiten Schläfenbogen durchzogen, und so entstehen eine obere und untere Schläfengrube (Hatteria, Krokodile). Den Bogen bilden das Postfrontale, Postorbitale, Squamosum und zuweilen das Supratemporale. 4. Der obere Bogen ist vorhanden, der untere fehlt (viele Eidechsen: Varan, Chamaeleon z. B.). 5. Die obere Schläfengrube ist durch Postorbitale, Parietale und Frontale völlig überdeckt (Seeschildkröten). 6. Der Schädel hat den oberen Bogen und ist mit einem vollständigen Kopfhautknochenpanzer großenteils verwachsen (Gerrhosaurus: Beweis, daß die bindegewebig entstehenden Schädelknochen nicht aus der Haut stammen, Trn.). Die Schläfenspangen vergrößern die Ansatzflächen für Kau- und Rückenmuskeln. — Das Gaumendach tritt bei Reptilien in 5 Formen auf: 1. Es ist im wesentlichen noch wie bei den Amphibien gebildet (alle Schlangen, fast alle Eidechsen). 2. Zuerst an den Palatinen, dann auch an Prämaxillaren, Maxillaren und Pterygoiden entsteht an dem bisher nur vorhandenen senkrecht stehenden Knochenteil ein horizontaler und schiebt sich horizontal unter das primäre Munddach, bis die Fortsätze sich berühren, so entsteht das sekundäre Munddach oder der harte Gaumen (Anfangsstadien bei manchen Eidechsen: Scinciden z. B.) 3. Das sekundäre Gaumendach ist ausgebildet; Praemaxillaria, Vomer, Palatina und Pterygoidea, nicht aber die Maxillaria nehmen daran teil (Hatteria). 4. Das sekundäre Gaumendach ist ausgebildet; Praemaxillaria, Maxillaria, Palatina, Vomer, nicht aber die Pterygoidea nehmen daran teil (Schildkröten). 5. Das sekundäre Gaumendach ist voll ausgebildet Praemaxillaria, Maxillaria, Palatina und Pterygoidea, nicht aber Vomer bilden es (Krokodile). — Die Ausbildung des sekundären Gaumens erzeugt mit die hinteren (= sekundären) Choanen. Diese münden bei Schildkröten hinter den Palatinen in die Mundhöhle; bei Krokodilen hinter den horizontalen Pterygoidflügeln. Bei Reptilien mit primärem oder Uebergangsmunddach münden die primären Choanen (Fig. 4 z. B.) ganz vorn in die Mundhöhle neben dem Vomer ein (Schlangen, Eidechsen und Hatteria).

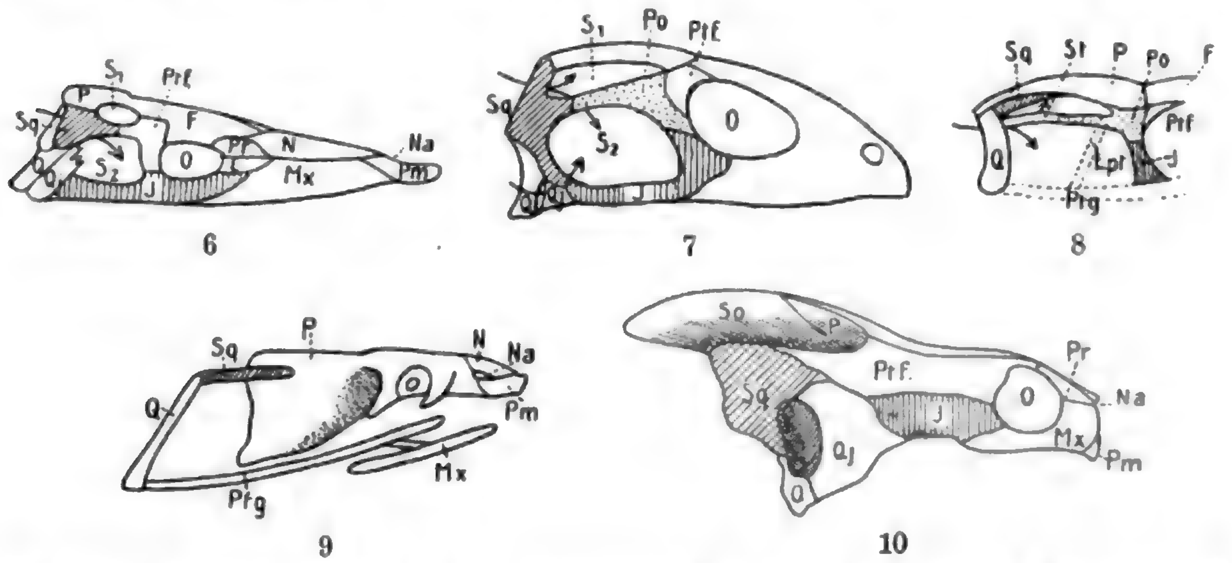


Fig. 6 bis 10. Die Schläfenbögen von Krokodil (6), Hatteria (7), Varan (8), Schlange (9), Chelydra (10). — Bezeichnung der Schädelelemente wie in Fig. 3 bis 5. — Nach Gadow.

Der Unterkiefer gelenkt am Quadratum,

und besteht aus 5—6 Knochen: Dentale, Angulare, Articulare, Operculare (= Spleniale: fehlt dem Chamaeleon), Supraangulare, Complementare mit Coronoidfortsatz. Im Dentale noch ein Rest des Meckelschen Knorpels. Beide Unterkieferhälften bei Schildkröten sehr früh fest verwachsend, bei Schlangen dauernd nur durch dehnbare Bänder verbunden.

Zungenbein bei Eidechsen aus dem Körper (Copula mit nach vorn gerichtetem Processus entoglossus) und jederseits 3 Spangen gebildet; die erste ist der echte Zungenbeinbogen (Hyoidbogen), die beiden hintersten sind aus Kiemenbogen 1 und 2 entstanden. — Das Zungenbein der Schlangen ist bis auf Hyoidbogenreste verkümmert; und auch diese können fehlen. — Bei Schildkröten sind die Hyoidbogen verkümmert zu Knochen- oder Knorpelkernen; dahinter 2 Hörnerpaare, aus Kiemenbogen 1 und 2 entstanden. Copula auch hier häufig mit Os entoglossum verwachsen. — Im Krokodil-Zungenbein nur der Körper und ein einziges Hörnerpaar, dessen Ursprungsart noch unbekannt ist.

β) Wirbelsäule. Bei den Geckonen sind die Wirbelkörper (Corpus, Centrum) noch bikonkav (amphicöl), und dazwischen erhalten bedeutende Chordareste. Bei Hatteria sind die Wirbelkörper auch bikonkav, aber es ist eine Bandscheibe dazwischen, die im unteren Teil einen Knochenkern (Intercentrum) umschließt. Einfache Bandscheiben befinden sich zwischen den Wirbeln beim Krokodil und vielen Eidechsen, besonders in Hals und Schwanz. Bei anderen Reptilien ist die verknöcherte Bandscheibe (als Wirbelepiphyse) mit dem benachbarten Wirbel verwachsen, so daß freie Gelenke entstehen; so entstanden konkav konvexe Wirbel (procöle): oder aber konvexkonkave (opisthocöle), oder, wenn die Bandscheibe von beiden benachbarten Wirbeln aus verknöcherte, bikonvexe (platycöle). Bei den meisten Reptilien sind die Wirbel procöl (konkav-konvex); im Hals der Schildkröten kommen aber alle Formen vor, und selbst bikonvexe mit von Chorda noch durchsetztem Intervertebralscheibenrest dazwischen. — Wirbelkörper und oberer Bogen der Reptilien verknöchern getrennt, und stoßen dann entweder in einer Knorpelfuge aneinander (Krokodil; zeitlebens ?), oder verwachsen untrennbar (Hatteria, Schlangen und einige Eidechsen). — Obere Dornfortsätze sind bei Krokodilen und vielen Eidechsen auch am Schwanz vorhanden; sie sind bei den Schildkröten am Rücken oben verbreitert und mit den Hautplatten verwachsen, sie fehlen den Schildkröten am Halse. — Die von den Wirbelkörpern ausgehenden Gelenkfortsätze sind stets vorhanden; zuweilen sendet aber außerdem auch der obere Wirbelbogen nach vorn einen Gelenkfortsatz (Zygosphen) aus, der in einem Ausschnitt (Gelenkhöhle, Zygantrum) des vorangehenden Wirbelbogens gelenkt (Schlangen, Iguana); oder der Bogen sendet den Gelenkfortsatz nach hinten aus (Hyposphen), der dann in einer Gelenkhöhle (Hypantrum) des nachfolgenden Bogens gelenkt. Diese Einrichtungen hemmen Aufkrümmungen der Wirbelsäule in der Rückenrichtung. — Untere Wirbelbogen (Hämapophysen, Chevron bones; im Schwanz bei Eidechsen, Krokodilen und einigen Schildkröten) setzen sich im Zwischenwirbelraum an. Statt ihrer zuweilen an Hals- und Rückenwirbeln unten einfache Wirbelfortsätze (Processus inferiores, Hypapophysen: Eidechsen, Krokodile, Schlangen); solche durchbrechen ferner die Speiseröhre bei der Schlange Dasypeltis scabra und dienen daselbst zum Zerbrechen von verschluckten Vogeleiern). — In den Schwanzwirbeln von Hatteria und Eidechsen (ausgenommen Varane, Chamaeleonen) zieht senkrecht durch die Mitte eine nicht verknöcherte Querzone, in ihr bricht der Schwanz ab (Wirbelteilstelle; Bruchstelle; aber nicht „präformierte Bruchstelle", Trn.). — Die Zahl der Wirbel beträgt bei der Schlange Python 422, bei schlangenartigen Eidechsen (Amphisbaeniden) nicht über 140.

Wo keine Gliedmaßen vorhanden sind (Schlangen, fußlose Eidechsen), sind in der Wirbelsäule nur Rumpf und Schwanzabschnitt zu unterscheiden; wo Gliedmaßen und Brustbein vorkommen (Krokodile, Hatteria, viele Eidechsen) treten Hals-, Rumpf-, Becken- und Schwanzregion auf; und im Rumpf bei einigen sogar ein Brust- und Lendenabschnitt (Krokodile). Alle Reptilienwirbel bis zum Schwanz (ausgenommen zuweilen der zweite) tragen dabei Rippen, doch sind die des Schildkrötenhalses nur noch an ihrer selbständigen Verknöcherung erkennbar.

Die Brustrippen gliedern sich zumeist in zwei Abschnitte; der untere, am Brustbein befestigte, ist entweder unverknöchert (Rippenepiphyse); oder verknöchert und kann dann sogar manchmal mit der eigentlichen Rippe gelenken (Pectoral-; und Sternalrippen = Sternocostalia); bei Hatteria und Krokodilen sind die Brustrippen dreigliedrig, führen also Intercostalia (Trn.). Hinter der Brust folgen gewöhnlich frei in der Bauchwand endende Rippen. Bei Chamaeleon, Uroplates und Acontias verwachsen aber mehrere der beiden Körperseiten miteinander in spitzem Winkel. Beim Krokodil folgt den freien Rippen eine rippenlose Lendenregion mit sehr starken Querfortsätzen, darunter liegt das Bauchsternum, das auch Hatteria besitzt, eingebettet in die Unterseite der Bauchwand. — Die Rippen sind

entweder ein- oder zweiköpfig; davon gelenkt dann der untere Kopf, das Capitulum, am unteren Querfortsatz (Paraphyse), der obere, das Tuberculum, am oberen Wirbelfortsatz (Diaphyse). Die Diaphyse entspringt entweder oben am Wirbelkörper; oder dicht darüber am oberen Wirbelbogen (Krokodil). — Beim Krokodil finden sich mächtige obere Querfortsätze entlang der Brust (rippentragend), wie auch in der Lendengegend (ohne Rippen), und am Schwanz. — Bei Hatteria und Krokodil gibt es an den Brustrippen am Hinterrand auch noch Processus uncinati, die selbständig verknöchern.

Kopf und Hals gelenken durch Atlas und Epistropheus, der einen Zahnfortsatz (Processus odontoideus) besitzt (eine Neuerwerbung über die Amphibien hinaus); dadurch ist der Kopf frei beweglich. Bei Krokodilen und Schildkröten liegt oben zwischen Atlas und dem Schädel eine Knochenplatte (das Rückenmark bei Kopfbeugung als Nackenschutzplatte bedeckend. Trn.); angeblich Rest eines sonst verschwundenen Wirbels: Proatlas (Gegenbaur ist berechtigt dagegen). —

Das bei lebenden Reptilien vorhandene Kreuzbein hat nur 2 Sacralwirbel; bei Chelone aber 3.

γ) Gliedmaßenskelett. Das Gliedmaßenskelett der Reptilien, dem der Amphibien unmittelbar angeschlossen, ist aber energisch zu besserem Forttragen des Körpers auf dem Lande fortgebildet; schon allein durch völlige Verknöcherung seiner Componenten. Der Schultergürtel der Hatteria und Eidechsen, nach gleichartigem Typus gebaut, zeigt (nach in Publikation befindlichen Untersuchungen des Referenten) folgendes (Fig. 11): Zwei aus einheitlicher Knorpelanlage entstehende Knochen stoßen mit Naht aneinander: Schulterblatt und Coracoid. Am Schulterblatt sind im Maximum unterscheidbar die Epiphyse (Suprascapula), dann ein Processus clavicularis (nicht Acromion, das erst bei Säugern zugleich mit der Spina scapulae als zuerst selbständiger Knochen entsteht, der dann mit der Spina verwächst, Trn.); an welchem bei Egernia whiti ein kleiner Knochen ansitzt (= dem Cleithrum des paläontologischen Reptils Pareiosaurus; und wahrscheinlich in beiden Fällen nur Epiphyse des Schlüsselbeins) mit daran angeschlossenem Schlüsselbein. Darunter am Schulterblatt ferner der Processus praecoracoideus scapulae und darin oft eine verdickte Knochenzone, Ramus praecoracoideus scapulae. — Das Coracoid besteht aus 3 Aesten, welche durch bindegewebig geschlossene Zwischenräume getrennt, sämtlich Epiphysen besitzen, die miteinander, sowie mit der des Ramus praecoracoideus scapulae einheitlich verbunden sind. Der vordere ist der Ramus praecoracoideus coracoidei, der mittlere der R. intercoracoideus, der hintere der R. postcoracoideus. Zwischen R. prae- und intercoracoideus liegt das Foramen coracoideum.

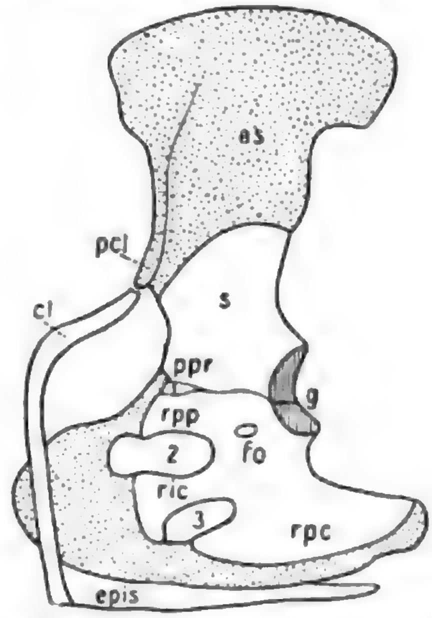


Fig. 11. Varanus niloticus. Linke Schultergürtelhälfte. cl Clavicula, epis Episternum, es Episcapula, g Gelenkfläche für den Oberarm, fo Formen coracoideum, pcl Processus clavicularis scap., ppr Processus praecoracoideus scap., ric Ramus intercoracoideus coracoidei, rpc Ramus postcoracoid. corac., rpp Ramus praecoracoideus corac., s Scapula, 1 bis 3 Foramina.

Beim Chamaeleon (Fig. 13), wo das Schlüsselbein fehlt, hat das Schulterblatt nur den Processus praecoracoideus (Acromion der Autoren); im Coracoid ist ein Foramen coracoideum, aber keine Trennung in 3

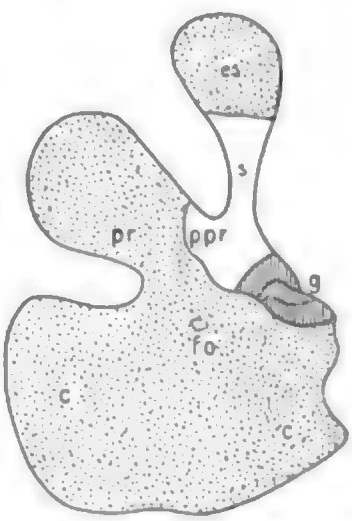


Fig. 12. Megalobatrachus maximus. Linke Schultergürtelhälfte. c Pars coracoidea der Schultergürtelhälfte, es Episcapula, fo Foramen coracoideum, g Gelenkfläche für den Oberarmknochen, ppr Processus praecoracoideus scapulae, pr Pars praecoracoidea der Schultergürtelhälfte, s Scapula.

Rami, sondern einheitliche Verknöcherung der Pars prae-, inter- und postcoracoidea (am gleichartig gebildeten Schultergürtel des paläontologischen Diplodocus im Processus praecoracoideus scapulae ein deutlicher Ramus).

[Bei den geschwänzten Amphibien besitzt jede einheitlich knorpelig angelegte Schultergürtelhälfte eine Pars scapularis, Pars praecoracoidea und coracoidea und ein Foramen coracoideum. Bei Megalobatrachus maximus aber (Fig. 12) verknöchern gemeinsam und einheitlich ein Teil der Pars scapularis und praecoracoidea (Bildung der Scapula mit Processus praecoracoideus). Bei Fröschen im Maximum der Ausbildung — Leptodactylus pentadactylus (Fig. 14) — ist jede Schultergürtelhälfte aus 4 Knochen gebildet: Scapula mit Processus praecoracoideus; Praecoracoid; Intercoracoid (Clavicula nach Gegenbaur, Praecoracoid nach Boulenger) mit Processus praecoracoideus; und Postcoracoid. Hier haben sich also alle Fortsätze einer primitiven Schultergürtelhälfte selbständig angelegt.]

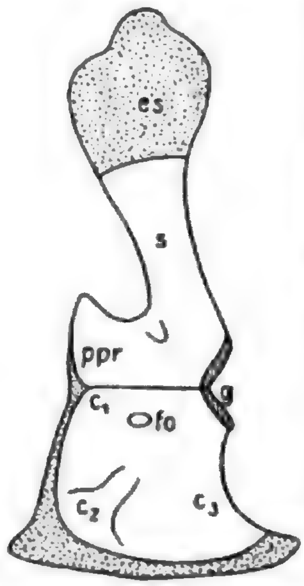


Fig. 13. Chamaeleon vulgaris. Linke Schultergürtelhälfte.. c_1, c_2, c_3 Coracoideum (c_1 Pars praecoracoidea, c_2 Pars intercoracoidea, c_3 Pars postcoracoidea), es Episcapula, fo Foramen coracoideum, g Gelenkfläche für den Oberarmknochen, ppr Processus praecoracoideus scapular, s Scapula.

Bei den Schildkröten gibt es nach dieser Anschauung: Schulterblatt, ein Post-, und ein Intercoracoid (Praecoracoid nach Gegenbaur; Clavicula nach Hoffmann). Bei den Krokodilen nur Schulterblatt und Postcoracoid (Coracoid der Autoren), die hier einen nach hinten schauenden stumpfen Winkel miteinander bilden.

Die Vordergliedmaße hat bei Hatteria und den Schildkröten: Chelydra, Emys, Emydura außer Oberarm, Radius und Ulna noch 9 bis 10 Handwurzelknochen wie bei Amphibien; d. h. 1 bis 2 Centralia, und die Carpalia 4 und 5 noch nicht zum Hamatum verwachsen; das Pisiforme ist als Neubildung der Reptilien entstanden (nach Gegenbaur von den Fischen ererbt); und auch die Knochen des sogenannten Praehallux und Praepollex sind sekundäre Bildungen, und dienen zu extremer Auseinanderspreizung von Fingern und Zehen (Trn.). — Spezialcharaktere der Eidechsen: Radius und Ulna unten weit auseinanderstehend; Intermedium verkümmert; 1 Centrale vorhanden. — Bei Krokodilen ist das Intermedium nicht nachweisbar; Radiale und Ulnare sind lang gestreckt sanduhrförmig. Im distalen Abschnitt der Handwurzel befindet sich eine Knorpelplatte (aus 2 Knochen entstanden), die Finger 1 bis 2 trägt; eine aus 3 Knorpeln entstandene trägt Finger 3 bis 5.

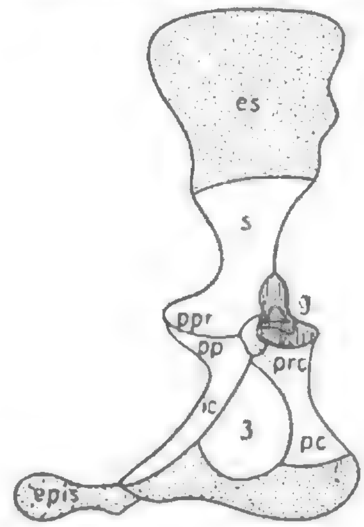


Fig. 14. Leptodactylus pentadactylus. Linke Schultergürtelhälfte. epis Episternum (= Praesternum Blgr.), es Episcapula, g Gelenkfläche für den Oberarm, ic Intercoracoideum, pc Postcoracoideum, pp Processus praecoracoideus intercoracoidei, ppr Processus praecoracoideus scap., prc Praecoracoideum, s Scapula, 3 Foramen inter- et postcoracoideum.

Die normale Fingerzahl der Reptilien ist 5. — Bei Hatteria und den meisten Echsen beträgt die Zahl der Fingerglieder vom 1. bis 5. Finger 2, 3, 4, 5, 2; ähnlich beim Krokodil; Chamaeleon hat zuerst 2, dann nur je 3; ebenso ist es bei den Schildkröten, mit Ausnahme von Testudo, wo an allen Fingern nur 2 sich befinden (Jäkels phylogenetische Einteilung der Reptilien nach der Finger- und Zehengliederzahl und Schläfenbogenbildung ist unzulässig).

Der Verlust der Vordergliedmaßen beginnt bei den Reptilien mit Abnahme der Fingerzahl von den Randfingern aus, dann folgt das Verschwinden der Gliedmaßenelemente von den Fingerendgliedern an fortschreitend einwärts, der Schultergürtel also zuletzt. Ganz ohne Vordergliedmaßenreste sind die Eidechsenfamilie Amphisbaenidae und die Schlangen.

Die Reptilienhintergliedmaßen gehen in folgendem über die der Amphibien hinaus: Drei Knochen bilden stets das Becken: Ileum, Ischium, Pubis; zwischen Ischium und Pubis befindet sich dabei ein größeres Foramen puboischiadicum. Tibia kräftiger entwickelt als Fibula. In der Fußwurzel verwachsen Tibiale, Intermedium und die 2 übereinander liegenden Centralia zum Astragalus (bei Varan: Tibiale nur erst durch Naht mit dem übrigen fest verbunden; bei Chelydra verhält sich das Centrale 2 ebenso. Trn.). Intermedium bildet seitdem (bei Säugern) im Sprunggelenk die äußere Rolle des Astragalus, das Tibiale die innere; das Centrale 1 den Astragalushals, Centrale 2 dessen Kopf. Bei Hatteria und Eidechsen kommt dabei neu hinzu das Naviculare (der Säuger) als ein Bandring (Meniskus) zwischen Astragalus und den Tarsalien 1 bis 3, und enthält bei Hatteria bereits 2 Knorpelkerne (Trn.). Tarsale 4 und 5 der Reptilien endlich sind zum Cuboid verwachsen. — Spezielle Fußcharaktere aller Reptilien sind alsdann: Wenn auch Tibia schon stärker als Fibula wurde, ist doch die Fibularseite der Gliedmaßen noch die genetisch stärkere (denn die Fibula gelenkt noch mit dem Oberschenkel und Calcaneus = Fibulare; das Cuboid ferner gelenkt stark mit Astragalus, und die Hauptachse des Fußes geht durch den Zeh 4). — Der Astragalus ferner ist stets der Tibia fest angefügt; Fußbewegungen am Unterschenkel finden deshalb im Intertarsalgelenk zwischen den zwei Fußwurzelhälften statt; oder auch im Intertarsal- + Calcaneus-Astragalus-Gelenk (nur Krokodile, Trn.). — Spezialcharaktere der einzelnen Ordnungen sind: Bei den Schildkröten sind Pubis und Ischium unten in der Körpermittellinie zumeist noch durch Knorpelspange verbunden; zuweilen nur bindegewebig (Trionyx, Chelone). Am Pubis ist ein Processus lateralis vorhanden, durch Band mit der Bauchschale verbunden. Dem Pubeszusammenstoß ist in der Körpermittellinie ein Knorpelvorsprung (Processus medialis, Gegenbaur; Epipubis, Wiedersheim) vorgelagert. Das Foramen obturatorium ist im Foramen pubo-ischiadicum mitenthalten. — Bei Hatteria und Eidechsen sind die Scham- und Sitzbeine in der Körpermediane durch Knorpel vereinigt. Pubis hat Foramen obturatorium und Processus lateralis (fehlt Chamaeleon). Epipubis ist selbständig verknöchert bei Geckonen; ebenso ein Knorpelvorsprung an der Vereinigung der Sitzbeine in der Mittellinie (Os cloacae; Hypoischium (Hoffmann). — Bei den Krokodilen Pubis ist fast horizontal nach vorn gerichtet, mit dem der anderen Körperseite nicht vereinigt, von der Bildung der Hüftpfanne ausgeschlossen, und gelenkt am Ischium. Ischium hat sich dafür im Pfannenbereich ausgedehnt, läuft dort in einen Vorder- und Hinterfortsatz aus, welche allein mit Ileum die Pfanne bilden. Die Pfannenmitte ist nicht verknöchert, nur bindegewebig verschlossen. Pubis ist ohne Processus lateralis und Foramen obturatorium; Ileum ist stark von vorn nach hinten verbreitert, die Hüftgelenkpfanne ist deshalb unter dem Sacralgelenk gelegen. Pubis und Ischium sind unten nur bindegewebig vereinigt. — Spezialcharaktere der Hintergliedmaßen sind: Bei Schildkröten sind alle Knochen der oberen Fußwurzelhälfte zu einer Einheit verschmolzen, an der allerdings das Fibulare sehr oft erst durch Naht untrennbar befestigt ist. Das Sprunggelenk ist unbeweglich fixiert, ebenso das Gelenk zwischen Fibulare und Astragalus. Die Zahl der Zehenglieder ist bei den meisten: 2, dann je 3; bei den Testudiniden nur je 2; bei den Trionychiden: 2, 3, 3, 4 oder mehr, 3. — Bei den 4füßigen Eidechsen ist das Sprunggelenk unbeweglich fixiert, ebenso das Gelenk Fibulare-Astragalus. Die Fußbewegungen finden deshalb im Intertarsalgelenk zwischen der oberen und unteren Fußwurzelhälfte statt. Die Zehengliederzahl ist bei den meisten: 2, 3, 4, 5, 3; nur bei diesen ist Tarsale 1 bis 3 mit den gleichnamigen Mittelfußknochen fest vereinigt oder verwachsen. Bei den Chamaeleoniden ist die Zehenzahl: 2 und dann je 3. — Bei Krokodilen hat der Astragalus typische Reptiliencharaktere, das Fibulare als Calcaneus dagegen ist völlig säugetierartig gebildet mit Sustentaculum tali und Hacke. In der unteren Fußwurzelhälfte sind embryonal 4 Knochen angelegt, die aber später teilweise verwachsen. Zeh 5 fehlt; Zeh 1 ist der weitaus stärkste. Beim Embryo Hyperphalangie (?). — Die Rückbildung der Hintergliedmaßen der Reptilien erfolgt nach demselben Prinzip, wie die der vorderen: zuerst verschwinden also die Randzehen, dann die Gliedmaßenelemente einwärts fortschreitend, zuletzt das Becken. Unter den Eidechsen haben die Amphisbaeniden, Anelytropiden, Annelliden usw. die Hintergliedmaßen völlig verloren, desgleichen die meisten Schlangen; nur bei Riesenschlangen und Glauconiaarten sind rückgebildete Unter- und Oberschenkel mit Spuren von Becken vorhanden.

Gliedmaßenbiologie: Alle mit 4 kräftigen Füßen versehenen Eidechsen, Schildkröten und Krokodile heben den Körper beim Gehen und Laufen vom Boden ab, aber nur wenig; Chamaeleon und die baumbewohnenden Iguaniden und Agamiden am höchsten. Beim Stehen legt sich aber der Rumpf dem Boden zumeist noch auf; bei Eidechsen aber oft gar nicht (Chamaeleon und Anolis), oder nur mit dem Beckenteil, während die Vordergliedmaßen den Brustteil auch dann noch hochhalten (Lacerta). Oberarme und Oberschenkel bewegen sich dabei in der Horizontale.

Die Krokodile sind vorzügliche Gliedmaßenschwimmer. Eine Anzahl Eidechsen (Chlamydosaurus kingi, Basiliscus, Amphibolurus muricatus) laufen streckenweise rein auf den Hinterbeinen und fallen, wenn sie dann nichts Aufragendes antreffen und emporklettern, zu Boden. Die Bewegungen der Gliedmaßen sind dabei aber typisch reptilienhaft, d. h. die Oberschenkel laufen in der Horizontalen, und nicht etwa wie bei Säugern oder Vögeln mit dem Schaft vertikal am Körper; denn es fehlt den Reptilien am Oberschenkel ein mit dem Schaft einen Winkel bildender Hals, der den Hüftgelenkkopf seitwärts trägt; und der Hüftgelenkkopf der Reptilien ist ferner ein langgestrecktes Oval, das senkrecht auf der Längsachse des Knochens liegt (Trn.).

Bei den Landwirbeltieren können die beiden Hälften des Schultergürtels unten in der Körpermittellinie entweder sich überlagern (geschwänzte Amphibien, Frösche mit Schiebebrust [Batrachia arcifera] und Schildkröten); oder sich unten direkt aneinanderlegen, wo sie dann miteinander verwachsen: Starrbrustfrösche [Batrachia firmisternia]. Rippen bei Chamaeleon und Acontias; in diesen beiden Fällen fehlt dann dem Tier das Brust- oder Bauchsternum; oder ist nur dort und soweit entwickelt, wo und wie Raum vorhanden ist; oder endlich: die Schultergürtelhälften und Rippenenden des Reptils kommen in der Körpermitte unten nicht zusammen, und es können dann daselbst aus bindegewebigen Partien der Bauchwandränder das Brust- und Bauchsternum zur Entwicklung gelangen. Beide nach demselben Prinzip, das am besten am Entstehen des Bauchsternums (Parasternum) dargestellt wird (in Fig. 15: von 1—5 fortschreitend). Bei kleinem Raum tritt es im einfachsten Fall (Fig. 15: vor 1) in Form eines in der Bauchmitte entlang ziehenden Knorpelstreifens auf, aus welchem bei anderen Tieren einzeln liegende Knochenkerne sich herausdifferenzieren können (Acontias, Fig. 15: zwischen 1 und 2); wo aber noch mehr Zwischenraum zwischen den Rippenspitzen vorhanden ist, können auch zwei nebeneinander liegen (Brustbein der meisten Eidechsen); bei noch weiterem Zwischenraum kann zwischen diesen beiden Bauchgürtelknochen noch ein dritter entstehen (Hatteria); und im Extrem sogar zwei (Krokodil). — Brustgürtel und Bauchsternum fehlen den Schildkröten, weil da jede Schultergürtelhälfte unten durch einen Bindegewebsstrang geschlossen wird und die beiden Hälften einander überlagern, dagegen kommt den Eidechsen, Hatteria und den Krokodilen ein ansehnlicher Brustgürtel zu (bestehend aus den Elementen: Episternum und Sternum), der mehr oder weniger innig mit dem Schultergürtel und den Rippen in Verbindung stehen kann, und, wie Figur 15 vorn ohne weiteres zeigt, auf gleiche Weise aus den Bauchwandrändern entsteht, wie das Bauchsternum. Zu ihm gehören genetisch auch die Schlüsselbeine, die dem Episternum fest anliegend, nach oben an die Scapulaepiphyse (Suprascapula) ziehen (die Idee, daß die Schlüsselbeine, wie Brust- und Bauchsternum aus Hautknochen entstanden seien, die in die Bauchwand einwanderten und sich in die Muskulatur daselbst einfügten, ist nicht berechtigt. Die Tatsache, daß Clavicula und Episternum aus bindegewebiger Anlage verknöchern, beweist dafür nichts; und ebensowenig die andere Tatsache, daß Sternalelemente „zuweilen" mit den Rippenenden untrennbar verbunden sind. Trn.). Clavicula und Episternum dienen als Hebel für selbständige Bewegungen des Schultergürtels am Rumpf; das Brustbein hauptsächlich zur Betätigung der Lungenatmung und bei den Reptilien nebenbei als Träger des Schultergürtels; das Bauchbein ist notwendig für tiefes Ausatmen (Fauchen beim Krokodil) und als energische Eingeweidepresse (Trn.). — Spezialcharaktere: Das Episternum ist +-förmig bei Eidechsen und Hatteria, einfach lanzettförmig bei Krokodilen. Das Brustbein der Eidechsen bildet vorn gewöhnlich eine breite Platte (Mesosternum), mit der jederseits eine oder mehrere Rippen gelenken können; es setzt sich dann nach hinten in Form von 2 getrennten Spangen (Metasternum) fort, deren Schlußknorpel ohne direkte Beziehungen zu Rippen sind (Xiphisternum). Den Schlangen fehlt Brustbein wie Bauchsternum.

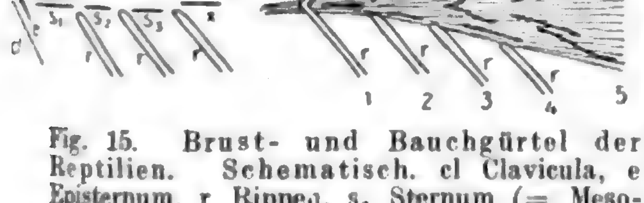


Fig. 15. Brust- und Bauchgürtel der Reptilien. Schematisch. cl Clavicula, e Episternum, r Rippen, s_1 Sternum (= Mesosternum), s_2 und s_3 Metasternum, x Xiphisternum. — Die längsschraffierten Stellen von 1 bis 5 zeigen das Entstehen des Bauchgürtels (Bauchsternums) von einfacher Knochenspange (zwischen 1 und 2) bis zu 4 Spangen in einer Zone (bei 5).

2d) Muskulatur. Zu einer wirklich vergleichend anatomischen Darstellung der Reptilienmuskulatur liegt Material noch nicht vor. Von Hautmuskeln sind besonders wichtig die der Schlangen, welche zum Bewegen des Körpers auf dem Bauch Verwendung finden. Sie sind genetisch auf den Musculus rectus lateralis, rectus medialis profundus und superficialis der Eidechsen zurückzuführen. Sie richten die Bauchschilder und Bauchrand-

schuppen auf, so daß sie mit ihrem hinteren freien Rand auf der Unterlage einen festen Stützpunkt gewinnen, woran der Körper dann vor- oder rückgeschoben wird. Auch noch von den Rippen zu diesen Schuppen verlaufende Muskeln (Musculi costo-cutanei) gehören dazu, sie krümmen und strecken den Körper und ziehen ihn auf dem Integument vorwärts (Maurer und Buffa). — Die Reptilien besitzen ferner einen, aus glatten Muskelelementen gebildeten Hautmuskelapparat zum Oeffnen und Schließen der Naslöcher. — Von den Skelettmuskeln sind die Parietalmuskeln hoch entwickelt, zu ihrem Ansatz dienen die Temporalbögen und die zumeist kräftig entwickelte Parietalcrista. — Bei den Reptilien beginnt ferner die noch bei Amphibien einheitliche Rumpfhöhle (Pleuroperitonealhöhle) in Brust- (Pleuralhöhle) und Bauchhöhle (Bauchcölom, Abdominalhöhle) zu zerfallen. Am weitesten ist das gediehen bei den Krokodilen, wo die Trennung durchgeführt und ein gut ausgebildeter Zwerchfellmuskel vorhanden ist. — Wie die Kiemen fehlen auch deren Muskeln den Reptilien. — Die große Beweglichkeit des Quadratums am Schädel ist an eine besondere Muskulatur geknüpft; die von der Schädelbasis zum Quadratum, Pterygoid und Vomer zieht. — Die Rumpfmuskulatur zeigt bedeutende Fortschritte zur Ausbildung langgestreckter Muskeln; der Schwanz der Eidechsen und Krokodile dagegen hat noch ganz primitive Verhältnisse in ausgesprochener Metamerie der Muskulatur, aber sehr bedeutende Verlängerung der Myocommata. Bei den Schildkröten bewirkt die Vereinigung des Rückenschildes, mit den Rippen und die mächtige Ausbildung des starren Bauchschildes gewaltigen Muskelschwund, nämlich Verschwinden der Bauchmuskeln, und auch die ganze Rückenmuskulatur kann fehlen (Testudo). Die Schwanzmuskeln zeigen noch eine myomere Struktur und befestigen sich zum Teil am Innern der Rückenschale. Für die Schildkröten ist ferner ein Coracohyoideus als Herabzieher des Zungenbeins wichtig, und der Sternocleidomastoideus entspringt vom Squamosum und setzt sich an den Bauchschild an als Rückzieher des Kopfes in die Schale.

2e) Nervensystem. α) Gehirn (über die einzelnen Hirnkomponenten siehe den Artikel „Amphibien" Figur 11). Für die Reptilien charakteristisch ist: Die einzelnen Gehirnabschnitte liegen nicht mehr so rein nebeneinander wie bei den Amphibien, sondern mehr übereinander (am meisten bei den Eidechsen). Die Riechlappen sind den Hemisphären direkt angelagert (Anguis, Typhlops) oder ein Tractus mit endständigem Bulbus ist vorhanden (Hatteria, Lacerta, Krokodile). Das Vorderhirn hat relativ geringen Umfang; es überlagert aber gewöhnlich fast vollständig das Zwischenhirn (am wenigsten bei Schildkröten); bei den Krokodilen ist am Vorderhirn unten hinten ein Lobus hippocampi abgesetzt. Aber die äußere Schicht der Rindensubstanz ist hier überall bedeutend besser ausgebildet wie bei den Amphibien, sie besitzt ein Rindengrau, also den Sitz höherer psychischer Funktionen. Es bildet sich auch eine „Riechrinde" am Pallium. Am Zwischenhirn unten ein deutliches Infundibulum, sowie oben eine Epiphyse und ein Parietalorgan. — Die 2 Mittelhirnhügel zeigen die Neigung in 4 Hügel zu zerfallen. Das Hinterhirn ist gewöhnlich mäßig entwickelt am meisten bei Krokodilen) und legt sich zuletzt kappenartig eine Strecke weit über die Rautengrube hinüber. Es hat aber schon eine verdickte Mittelpartie als Vorläufer des Wurmes der Vögel und Säuger und 2 flügelartige Seitenpartien. Das Nachhirn (Medulla oblongata) ist bei allen Reptilien charakterisiert durch deutliche Einkrümmung nach unten, hat aber noch relativ beträchtliche Länge. —

β) Rückenmark. Das Rückenmark reicht bis in die Schwanzspitze hinein, zeigt aber bereits bei Reptilien mit kräftigen Gliedmaßen ansehnliche Anschwellungen (Intumeszenzen) dort, wo die Gliedmaßennerven entspringen. Die bisher noch einfache Rückenmarksmembran (Meninx primitiva) sondert sich nunmehr in zwei (Dura- und Urpia mater, die durch den Subduralraum getrennt sind).

2f) Sinnesorgane. α) Tastkörperchen. Als Hautsinnesorgane sind Tastkörperchen in verschiedener Ausbildung vorhanden. Entweder erst einzellig in der Grundzone der Oberhaut mit Nerven in Zusammenhang (Hatteria, Chamaeleon); dann aus mehreren Zellen bestehend, auch noch epidermal im Hinterrand der Schuppen in pigmentlosen Gruben (bei Eidechsen und Schlangen; apical pits, Boulenger); dann endlich einen Wall mit Einsenkung bildend und aus der Lederhaut aufsteigend (Krokodile).

β) Geschmacksorgane. Geschmacksorgane von typischer Form (Mantelzellen und zentrale Stiftchenzellen) bei Eidechsen und Krokodilen im hinteren Teil des Munddachs; die Zunge und der vordere Abschnitt der Mundhöhle sind hier dagegen ganz verhornt und drüsenlos.

γ) Geruchsorgane. Bei den Reptilien verlassen die Riechfasern durch nur 2 Oeffnungen der Siebmembran den Schädel. Die Nase gliedert sich in 2 Abschnitte: Vorhof, nach außen gelegen (Atemraum); und Hauptraum, dahinter einwärts gelegen (Riechraum); nur hierin befindet sich Riechepithel an einer großen, nach innen leicht abwärts umgerollten Muschel ohne Skelettanlage (den

Schlangen fehlt der Vorhof; aber die Muschel ist da). Im Muschelraum liegt eine Drüse, die in den Vorhof mündet; unter der Muschel tritt der Tränennasengang zur Nase, kann aber auch am Dach der Riechhöhle (Geckonen) oder in die Choanen münden (Schlangen), welche aus dem Riechraum, durch den Vomer getrennt, zum Munddach führen. Bei Eidechsen sind die äußeren Nasenlöcher zumeist seitlich am Kopf; bei Schildkröten vorn an der Schnauze; bei Krokodilen ganz auf der Schnauze, und der Riechraum ist hier — in Beziehung zur Länge der Schnauze — langgestreckt und mit 2 Muscheln, einem dritten muschelartigen Nebenwulst und Nebenräumen versehen. — Nebennase (Jakobsonsches Organ, Organon vomeronasale, Fig. 16): Bei Schildkröten (in einfach-

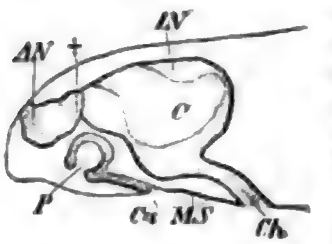


Fig. 16. Eidechse. Schematische Darstellung des Geruchsorgans. Sagittalschnitt. AN und IN äußere und innere Nasenhöhle, C Muschel, Ca Verbindungsrohr vom Jacobsonschen Organ zur Mundhöhle, Ch Choane, MS Mundschleimhaut, P Papille des Jacobsonschen Organs, + röhrenartige Verbindung zwischen den beiden Nasenhöhlen. Nach Wiedersheim.

ster Form: Testudo) besteht sie aus einer rechts- und linksseitigen einfachen Ausbuchtung vom Riechraum unter Differenzierung einer Schleimhautstrecke und ohne Verbindung mit der Mundhöhle; zuweilen ist sie auch verästelt. Bei Eidechsen und Schlangen ist sie von der Nasenhöhle ganz abgesondert, die beiden Schläuche sind voneinander durch die vordere Nasenscheidewand getrennt. Hier sind auch schon Ausführungsgänge im Munddach vorhanden, und zwar für jeden Schlauch einer ganz vorn zwischen Vomer und Prämaxillare und in Beziehung zu den gleichseitigen, gleich dahinter liegenden Choanen. Bei Krokodilen wird dies Organ noch embryonal angelegt, verschwindet dann aber (Röse). Im Innern jedes Schlauches ist reichlich Riechepithel und am Boden eine Papille. Sie dient zur Prüfung des Mundinhalts, wenn dieser Geruchsstoffe mit enthält.

δ) Sehorgane. 1) Hauptaugen (laterale paarige Augen): der Augapfel ist verhältnismäßig groß. Die Sclera ist hinten stets stark knorplig, vorn darin ein geschlossener Ring von Knorpelplättchen mit dachförmiger Ueberlagerung (Scleralring: fehlt den Schlangen und Krokodilen). Der Ciliarmuskel ist quergestreift. Von der Chorioidea ausgehend befindet sich bei den Eidechsen ein fächerartiges Gebilde (Polster) ohne Faltenbildung; entweder vom Sehnerv bis an die Linse reichend (Lygosoma); oder 2-wulstig (Iguana); oder pigmentführend und mit Blutgefäßen (Chamaeleon); oder bei Schlangen und Krokodilen nur angedeutet. — Die Reptilieniris arbeitet blitzschnell bei Lichtschwankungen. Die Pupille ist rund, oder oval, oder ein senkrechter Schlitz (Krokodile, Vipern). Direkte Linseneinstellung erfolgt nur bei Schlangen durch einen besonderen Irismuskel; der Ciliarmuskel fehlt hier; bei allen anderen Reptilien entspannt er durch Zusammenziehung die Linsenkapsel und bewirkt Vermehrung der Linsenkrümmung. — In der Reptilienretina sind nur Zapfen, keine Stäbchen; im Zapfen finden sich zuweilen buntgefärbte Oeltröpfchen. — Ein Retractor bulbi ist vorhanden bei Alligator, Chelonia und Eidechsen; — Krokodile, Schildkröten und die meisten Eidechsen haben 2 Augenlider und im inneren Augenwinkel bewegliche Nickhaut. Bei den Eidechsen (Geckonen, Ablepharus) und den Schlangen sind die Augenlider verwachsen und zu glasheller Haut umgewandelt. Alle Stadien dieser Entwicklung sind in den Eidechsen-Familien Lacertidae und Scincidae zu finden; bei den Schlangen wird diese Augenkapsel embryonal durch 2 selbständige Augenlidfalten gebildet, die später zusammenwachsen (Rathke). — Bei Chamaeleon ist das Augenlid ringförmig, nur die Pupille freilassend. —

2) Stirnauge (unpaares Auge, Stirnorgan, Parietal- oder Parapinealorgan). Es ist eine Ausstülpung aus dem Zwischenhirndach; bei Eidechsen im Scheitelbeinloch (Foramen parietale) bis an die Schädeloberfläche reichend. Unter pigmentloser, durchsichtiger, vorgewölbter Hüllhautstelle erscheint es als ein Bläschen mit linsenartig verdickter Stelle unter der Haut und doppelter Wandung (als Retina und Sclera gedeutet). Es hat im Innern ein glaskörperartiges Gebilde und ist durch Nervenfasern mit dem Gehirn verbunden; ist also als Auge nach Wirbellosentypus gebaut. Besonders gut ausgebildet ist es bei Lacerta, Waran, Hatteria. Es steht in Verbindung mit einem zweiten einfachen Bläschen (Epiphyse, Pinealorgan, Zirbeldrüse); auch dieses ist eine Ausbuchtung des Zwischenhirns und wahrscheinlich ein zweites Scheitelauge.

ε) Hörorgan. Im Hörorgan der Reptilien sondert sich der die 3 Bogen tragende Utriculus schärfer von dem daran hängenden Sacculus durch Vielengerwerden des Verbindungskanals (Canalis reuniens); und am Sacculus kommt es zu wesentlich stärkerer Ausbildung der Schnecke. Diese bei Schildkröten und Schlangen erst einfache Ausbuchtung des Sacculus, wird bei Eidechsen an ihm fortschreitend zu kanalartigem An-

hang und zum Schluß durch Krümmung und schwache Spiraldrehung zur Schnecke (Eidechsen und Krokodile); gleichzeitig trennen sich in der werdenden Schnecke Papilla acustica und basilaris voneinander; Scala tympani und vestibuli sind bereits deutlich angelegt. — Dem Hörorgan liegt entweder die Paukenhöhle vor, oder fehlt (bei Schlangen und Amphisbaenen durch Rückbildung; sowie hier auch die Ohrtrompeten). Wo eine Paukenhöhle vorhanden ist, besteht sie zumeist aus Vorder- und Hinterabschnitt, die durch einen Kanal verbunden sind. Begrenzt wird sie durch das Quadratum und benachbarte Schädelknochen, aber an der Hinterseite auch zuweilen durch Weichteile (Chelone, Emys, Eidechsen). Die Paukenhöhle der Krokodile hat luftgefüllte Nebenhöhlen in benachbarten Knochen. — Das die Paukenhöhle nach außen abschließende Trommelfell kann vorhanden sein oder fehlen (Hatteria, Chamaeleon, Schlangen): Verbunden wird es mit der Fenestra ovalis durch die Columella; deren Binnenteil verknöchert ist (stapes), deren äußerer knorpelig ins Trommelfell geht (Extracolumella). Bei Schlangen ist die Columella dem Quadratum außen angefügt; auch bei Chamaeleon. — Bei vielen Eidechsen liegt eine Hautfalte als äußerer Gehörgang um das Trommelfell; bei Krokodilen über ihm ein niederklappbarer Wulst mit Hautknochen. — Bei Lacerta stehen beide Paukenhöhlen mit dem Rachen unmittelbar in Verbindung; bei den anderen Reptilien sind Ohrtrompeten (Eustachische Röhren) vorhanden; entweder getrennt mündend (Schildkröten), oder mit gemeinsamem Kanal (Krokodile, Eidechsen). Bei den Krokodilen sind die Ohrtrompeten ein kompliziertes Röhrensystem, am Munddach durch Klappe verschließbar. — Der aus dem Sacculus des Hörorgans heraustretende Lymphapparat des Ohres (Ductus endolymphaticus) wird bei Geckonen und Chamaeleon zu mächtiger Anschwellung mit Verästelungen, die vom Ohr bis zum Schultergürtel, zur Wirbelsäule und in die Orbita reichen kann; er enthält einen zähflüssigen, mit Kalkkristallen gemischten Brei.

2g) Mundhöhle und Darmkanal. Lippen fehlen den Krokodilen; sie sind bei den Schildkröten zumeist durch die Hornscheiden der Kiefer ersetzt; bei Hatteria, Eidechsen und Schlangen dagegen sind sie vorhanden und sind dann außen mit hornigen Lippenschildern bedeckt. — Kieferzähne fehlen den Schildkröten; sonst sind sie vorhanden; entweder in einer nach innen offenen Kieferrinne sitzend und der benachbarten Innenseite der Kieferfirste angewachsen (pleurodontes Gebiß: Lacerta, Waran), oder der Kieferfirste aufsitzend (akrodontes Gebiß: Chamaeleon, Iguaniden), oder von einer Kieferhöhlung allseitig umschlossen (thekodontes Gebiß: Krokodile). Die Kieferzähne sind zumeist kegelförmig und wenig verschieden. Ausnahmen: Die Zähne sind zweischneidig, scharf, zusammengedrückt: Chamäleon; oder die scharfen Ränder sind vielspitzig: Iguana; das Gebiß ist heterodont: bei Hatteria und Uromastix, mit großen Schneidezähnen; bei Krokodilen mit mehreren Eckzähnen; und vor allem im Gebiß der Giftschlangen. — Der Zahnwechsel ist zumeist dauernd. Der Eizahn der Eidechsen und Schlangen ist ein echter umgewandelter Zwischenkieferzahn; er ist breit lanzettförmig, mit dem Kiefer verwachsen, wagerecht stehend, dient zum Aufschlitzen der Eischale, wie die Eischwiele der Krokodile und Schildkröten; er wird nach Gebrauch abgeworfen. Nebenzähne sind bei Eidechsen und Schlangen auf Vomer, Palatinum und Pterygoid möglich, entweder einzeln vorkommend oder zusammen (auf Palatinum und Pterygoid bei Schlangen). Die Zähne entstehen angeblich durch Einwandern aus der Hüllhaut in den Mund, in Wirklichkeit aber entodermal aus verknöcherten Papillen der Munddarmwand (Trn.). — Munddrüsen sind stets reichlich vorhanden; sie liegen nur selten noch einzeln (Seeschildkröten und Krokodile wie bei Amphibien); zumeist in Gruppen. Die Drüsen der Schlangengiftzähne sind aus Munddrüsen entstanden; sie leiten das Gift durch einen Ausführgang an den Zahn, und dieser durch eine Längsfurche (Furchenzähner) oder einen geschlossenen Längskanal (Viperiden) in die Bißwunde. Bei Vipern erfolgt die Entleerung der Giftdrüse automatisch beim Biß, durch Druck von den Kaumuskeln aus; bei Doliophis liegen die Giftdrüsen als 2 lange Schläuche in der Bauchhöhle. Die Unterzungendrüse der Eidechse Heloderma wirkt giftig, sie hat 4 den Unterkiefer durchbohrende Ausführungsgänge für die Furchenzähne des Unterkiefers. — Zur Bildung der Zunge vereinigen sich mit dem Zungenbogen der bei Reptilien funktionslos gewordene 1. und 2. Kiemenbogen, sowie mächtige seitliche Zungenwülste. Die Zunge ist bei Eidechsen von sehr verschiedener Gestalt, daher deren frühere systematische Gruppierung in Wurm-, Dick-, Kurz- und Spaltzüngler. Die Zunge der Schlangen ist 2-spitzig. Sie ist wenig beweglich bei Schildkröten und Krokodilen; bei Chamaeleonen ist sie weit vorschleuderbar durch Zusammenziehen eines Ringmuskels, der als abgleitbare Scheide dem Zungenbeinkörper aufsitzt (Trn.); und kann zurückgezogen werden. Bei Eidechsen und Schlangen ist die Zunge zumeist vorstreckbar als Tastorgan; bei den Eidechsen wird sie auch durch Anlegen an den noch nicht völlig geschlossenen harten Gaumen benutzt,

um die Atemluft direkt in den Kehlkopf hineinzuleiten. — Die genetisch zu den Mundorganen gerechneten Schild- und Thymusdrüsen sind vorhanden. Die Schilddrüse (Thyreoidea) liegt in der Halsmittellinie und zumeist in der Nähe der Endteilung des Arterienstammes; von den Thymusdrüsen liegt je eine seitlich am Halse neben den Blutgefäßstämmen, sie haben zumeist Lappenbildung. — Speiseröhre, Magen, Darmkanal und ihre Anhänge bieten nichts besonderes. Die Speiseröhre geht meist ohne scharfe Grenze in den erweiterten Magen über, der gewöhnlich noch ganz gestreckt verläuft, oder sich doch nur im Pylorusteil etwas umbiegt (Eidechsen), oder quer stellt (Schildkröten). Eine ringförmige Klappe bezeichnet die Magengrenze gegen den Dünndarm, der besonders bei Schildkröten und Krokodilen zahlreiche Windungen aufweist. Bei Chelone hat die Speiseröhre starke, nach hinten gerichtete Hornpapillen; bei Krokodilen Längsfalten, und der Magen ist hier auch deutlich sackartig abgesetzt. Der Afterdarm ist vom Dünndarm durch größere Weite sofort unterscheidbar; bei Eidechsen kann er beginnende Schlingenbildung zeigen; eine Ringfalte oder Klappe schließen ihn vom Dünndarm ab.

2h) Atemorgane. Die Reptilien haben ausschließlich Lungenatmung; die embryonal noch angelegten Kiemenbögen werden bereits in der Eihülle rückgebildet. Die Einführungswege, Kehlkopf (Larynx) und Luftröhre (Trachea), sind stets gut entwickelt. Der Reptilienkehlkopf hat bereits Säugetiercharakter: Ring- und Gießkannknorpel (Cricoid- und Aryknorpel) sind gut ausgebildet; kehldeckelartige Bildungen befinden sich an ihm bei Eidechsen, Schlangen, Schildkröten; Stimmbänderbildung bei Chamaeleon und Geckonen; er liegt wegen der fehlenden Kiemen den Luftwegen näher wie bei Amphibien, besonders bei Schlangen und Waran; er ist bei Krokodilen und Schildkröten in den Zungenbeinkörper gleichsam eingebettet. Die Luftröhre hat gut ausgebildete Knorpelringe, die aber zuweilen dorsalwärts erst bindegewebigen Verschluß zeigen (Python). Die Luftröhre ist gewöhnlich ansehnlich lang, bei Testudo pardalis und Cinixys darmartig gewunden; sie tritt entweder direkt mit je einer Oeffnung in die Lunge ein (Eidechsen) oder spaltet sich schon vorher in 2 Gänge (Luftröhrenäste, extrapulmonale Bronchien), die dann jeder in eine Lunge eintreten. In der Lunge selbst befindet sich bei Schlangen von der Wand ausgehend ein Scheidewandsystem (das blutzu- und -abführende Gefäße umschließt) von bienenwabenartiger Anordnung, dessen Hohlräume als Nebenluftgänge in den großen Binnenhohlraum der Lunge (Zentralkanal) einmünden. Die Nebengänge selbst sind dicht mit kleinen Ausbuchtungen besetzt: Alveolen. — Bei den Eidechsen sind die Nebengänge zumeist stark in das Lungeninnere hinein verlängert und der Zentralkanal ist daher um ein gleiches verkleinert; bei Schildkröten und Krokodilen haben die Nebengänge seitlich ausstrahlende Nebengänge zweiter und dritter Ordnung gebildet, und der Zentralkanal ist zu interpulmonalen Bronchien geworden, die im Anschluß an den Außenbronchus eine Strecke weit von oben her Knorpelringe besitzen können, die manchmal selbst an oberen Nebengängen der Lunge auch noch vorhanden sind. — Bei schlangenähnlichen Eidechsen ist die rechte Lunge kleiner als die linke; bei den Schlangen ist sie stark oder ganz verkümmert (so bei Vipern und Seeschlangen). Bei vielen Eidechsen und besonders Schlangen läuft der Lungenzentralkanal nach hinten in einen großen Luftsack aus, der kein alveoläres Fachwerk trägt; bei Chamäleon, Krokodilen und Waran tun dies fast alle Nebengänge auch (Organe zum Aufblasen des Körpers, zum Zischen, und bei Schlangen außerdem Luftreservoire zum Atmen beim Ganzverschlingen großer Tiere. Trn.). [Nach Hoppe-Moser und Wiedersheim wächst die Luftröhre von oben her dauernd in die beständig stärker werdende Wand der Lunge hinein, resorbiert sie, und dehnt sich so mit Aesten und Nebengängen auf Wandkosten aus. Woher aber die Verdickung der Lungenwände und die Luftsäcke an der Lunge? Richtiger dürfte sein: Stärkere Luftzufuhr dehnt vorhandene Lungen in nichtausgefüllte Rumpfhöhlenabschnitte hinein aus, blutzu- und abführende Gefäße mit dem notwendigen Stützgewebe wachsen dann von der Lungenperipherie her in die vergrößerten Räume hinein, d. h. Einatmungs- und Blutreinigungsfähigkeit der Lungen wachsen so parallel. Trn.].

2i) Blutgefäßsystem (Kreislauforgane). Die Reptilien haben nur Lungenatmung. Das Herz liegt in der Brust mehr oder weniger weit hinter dem Schultergürtel (Gegensatz zu den Amphibien). Der die Venen unmittelbar vor dem Herzen sammelnde Sinus venosus ist klein, gleichsam in den rechten Vorhof hineingezogen, indem die Einmündungsstellen der Venen näher aneinander rücken. Eine Scheidewand im Sinus beginnt ihn in mehrere Gefäße zu zerlegen (beste Ausbildung bei Schlangen, Chamäleon, Krokodilen). Die Vorkammerscheidewand ist völlig geschlossen (Fig. 17), und teilt zugleich die bei Amphibien einfache Vorkammer-Kammeröffnung (Foramen atrioventriculare) in 2 solche Oeffnungen, je für die rechte und linke Herzkammer, denn auch die bisher einfache Herzkammer ist durch

eine Scheidewand in eine rechte und eine linke Kammer geteilt. Die Trennung bleibt jedoch unvollständig, indem oben in der Herzkammerscheidewand ein Loch übrig

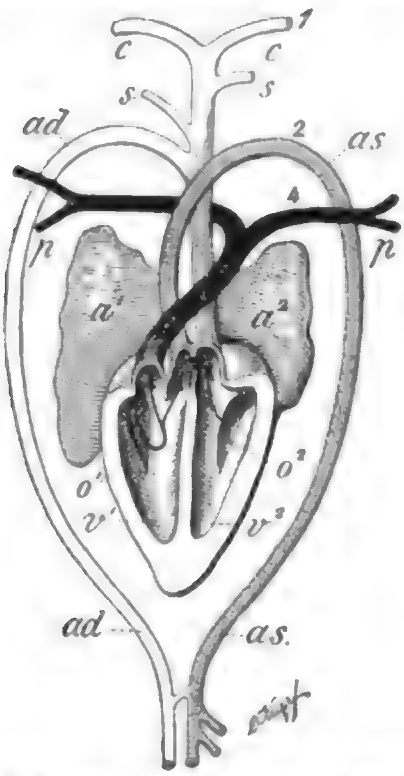


Fig. 17. Krokodil. Herz mit abgehenden Arterien. Schematisiert. a^1 rechte, a^2 linke Vorkammer, v^1 rechte, v^2 linke Herzkammer, o^1 rechtes, o^2 linkes Ostium atrio-ventriculare; die aufsteigende Arterie ist in 3 Aeste gespalten, von denen 2: Arteria pulmonalis p und linker Aortenstamm aus aus der rechten, der dritte aus der linken Herzkammer entspringt. Letzterer Stamm hängt mit dem linken Aortenbogen durch das Foramen Panizzae zusammen und gibt ab: ad den rechten (arteriellen) Aortenbogen, s die Subclavia, c die Carotiden, 1, 2, 4, sind die Zahlen der Amphibienkiemenbögen, die diesen Gefäßen hier gleichwertig sind. Die Pfeile im Herzen geben die Richtungen des Blutstromes an. Nach R. Hertwig.

bleibt (Foramen Panizzae). Vollkommen ist die Scheidewand nur bei Krokodilen. Auch der bei Amphibien aus der dort einfachen Herzkammer entspringende Bulbus arteriosus, der das dem Herzen entströmende Blut zusammenhält und dem Truncus arteriorum zur Verteilung zuführt, ist bei den Reptilien entweder ganz oder bis auf Reste verschwunden (Conusring zwischen Herzkammer und Truncus; klein bei Waran und Schlangen; größer bei Schildkröten). Der Truncus arteriosus ferner ist durch 2 darin stehende Längswülste in 3 Gefäße geteilt, die auch äußerlich geschieden sind. So mündet jetzt ein linker Aortenbogen und die Lungenarterie in die rechte Herzkammer, und ein das Kopfende des Truncus tragender Gefäßstamm in die linke Herzkammer. — Dieser Kopfgefäßstamm sendet bei Krokodilen aber gleichzeitig auch noch einen Ast am Herzen vorbei in die Körpermittellinie (rechter Aortenbogen), wo er mit dem aus der rechten Herzkammer kommenden linken Aortenbogen zur Hauptschlagader (Aorta descendens) verwächst. — Die Folgen für den Blutumlauf sind dadurch folgende: Das zum Herzen zurückkehrende venöse Blut geht in die rechte Vorkammer und von dort in die rechte Herzkammer, verläßt diese dann einmal durch das Foramen Panizzae, indem es in die linke Herzkammer eindringt, dann auch durch den linken Aortenbogen, wodurch es zum Teil in die Hauptschlagader überführt wird, und dann durch die Lungenarterie. Dieser Teil des Blutes wird nun in den Lungen aufgefrischt (arteriell) und tritt darauf durch die Lungenvenen in die linke Vorkammer, von dort in die linke Herzkammer und dann durch den Kopfgefäßstamm (Kopfgefäße und rechten Aortenbogen) in den Körper ein. Da ihm, wie schon erwähnt, durch das Foramen Panizzae und den linken Aortenbogen belastetes (venöses) Blut zugeführt wird, kommt es also damit durchsetzt in den Körper (Gegensatz: Säuger und Vögel, wo es völlig rein zur Verwendung kommt).

Das Verhalten der Arterienbögen ist nun bei den verschiedenen Reptilien verschieden. Bei den Schildkröten (Fig. 18) vereinigen

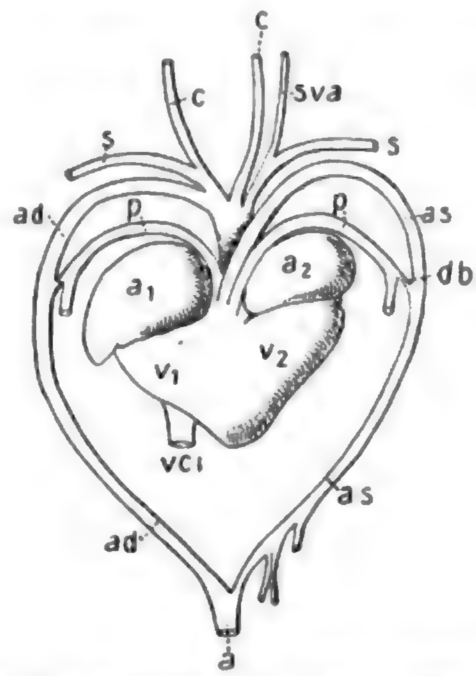


Fig. 18. Schildkröte. Herz. Bezeichnung wie in Fig. 17 und dazu: vci Vena cava inferior, db Ductus botalli, a Aorta descendens, sva Subvertebralarterie. Nach Haller.

sich je 2, aus dem Herzen kommende (ursprüngliche Kiemen-)Gefäßbogen zum rechten und linken Aortenbogen; und zwar dadurch,

daß die beiden Lungenarterienzweige bis nahe zum Herzen getrennt sind und zu jedem der bei den Krokodilen vorhandenen Aortenbögen einen Verbindungsgang (Ductus Botalli) hinübersenden. — Die Eidechsen stimmen damit auf der rechten Herzseite überein, auf der linken dagegen entspringt der linke Aortenbogen wie vorher, es kommt aber vom Kopfgefäßstamm noch eine Abzweigung zu ihm hinzu, und bei den Schlangen sind wieder nur 2 ursprüngliche Kiemenbögen zu den beiden Aortenbögen umgebildet.

Die Schwanzvene geht (nach Aufnahme der Hintergliedmaßen- und Rumpfseitenvenen) gegabelt in je eine Niere. Die von dort selbständig austretenden Nierenvenen vereinigen sich in der Körpermittellinie entweder sofort zur Vena cava inferior (Krokodile wie bei Amphibien) oder sonst erst dicht vor der Leber; die cava geht dann durch den rechten Leberlappen zum Herzen. Bei den gliedmaßenlosen Reptilien endlich fehlen natürlich auch die Gliedmaßengefäße (oben: Arteriae und Venae subclaviae; unten: Arteriae und Venae ischiadicae).

2k) Lymphgefäßsystem. Von dem zwischen Venen- und Arteriensystem eingefügten Lymphgefäßsystem sind 2 Kopfstämme in Verbindung mit 2 Brustlymphsträngen (Schlangen, Schildkröten, Krokodile), oder mit einem in 2 Aeste gespaltenen verbunden und münden in die Vena subclavia ein. Nur hintere Lymphherzen sind noch vorhanden und liegen auf der Grenze der Rumpf- und Schwanzgegend auf Wirbelquerfortsätzen oder auf Rippen; ihre Wand ist durch Muskelwirkung rhythmisch zusammenziehbar. — Die zu den blut- und lympheführenden Geweben gehörige Milz (Spleen, Lien) liegt bei Hatteria lang gestreckt an der Dünndarmmitte, dicht am Magen bei Lacerta, und sonst am hintern Dünndarmende. — Die Riechtonsillen sind bei den Reptilien in guter Ausbildung. — Nebennieren sind bei allen in unmittelbarer Nähe der Exkretionsnieren vorhanden.

2l) Harn- und Geschlechtsorgane. Bei den Reptilien sind Harn- und Geschlechtsorgane völlig voneinander getrennt. — Die Nieren sind relativ klein; meist länglich und gelappt, liegen der Bauchwand ganz hinten und oben fest an; oder oben dem Becken; sie können sogar bis in die Schwanzwurzel reichen und dort miteinander verwachsen (Lacerta, Iguana). Bei lang gestreckten Eidechsen liegen sie einander nicht gegenüber, sondern mehr oder weniger hintereinander; bei Schlangen unter größter Lappenbildung ebenso. Nur Schildkröten und Eidechsen besitzen eine Harnblase; sie fehlt aber Amphisbaenen und Waran. — Die kurzen Harnleiter (Ureteren) liegen den Nieren gewöhnlich fest an und münden getrennt voneinander in die Kloake. — Ansehnliche Reste eines Wolffschen Ganges haben weibliche Schlangen, Schildkröten und Geckonen.

Bei allen Reptilien sind paarige Ovarien vorhanden; oben am Hinterende der Bauchhöhle vor oder unter den Nieren. Jedes ist ein Sack mit starken Lymphräumen. Bei Schlangen befinden sich beide ungleichartig gelagert hintereinander. — Der Eileiter beginnt in der Leibeshöhle weit vom Ovar und zerfällt in mehrere Abschnitte; bei Schlangen z. B. so: Aus trichterartiger Eingangsöffnung (Ostium abdominale) führt ein spitzer werdendes Schaltstück in einen eiweißliefernden Teil, dann weiter ein verengertes Zwischenstück in eine kalkliefernde Kammer (Uterus) und dann in das Endstück; Eidechsen und Schlangen dagegen haben: einen Eingangstrichter, einen Fortleitungsgang, den Uterus, in dem die Schale gebildet wird, und ein Endstück (Scheide, Vagina). Die Eileiter münden getrennt in die Kloake; bei manchen Eidechsen in eine besondere Ausbuchtung daselbst; bei Schildkröten in den Hals der Harnblase. — Die Hoden liegen an gleicher Stelle wie die Ovarien vor oder unter den Nieren; sie sind kugel- oder bohnenförmige Gebilde; die Samenkanäle eines jeden gehen durch den goldgelben Nebenhoden in den Samenleiter (Vas deferens). Bei Eidechsen und Schlangen münden die Harn- und Samenleiter jeder Körperseite vereinigt in die Kloake, sonst getrennt. — Reste des Eileiters (Müllerscher Gang) mit streckenweise geschlossenem Ausführungsgang, aber offenem Eingangstrichter finden sich bei männlichen Emys europaea; und ebenso groß wie beim Weibchen bei ♂ von Lacerta viridis.

2m) Männliche Begattungsorgane. Bei Hatteria sind keine männlichen Begattungsorgane vorhanden, die Kloakenwand des ♂ wird vorgestülpt; Eidechsen und Schlangen besitzen zwei Penes in Form von 2 Schläuchen, die in Ruhe nebeneinander unmittelbar hinter dem After in entsprechenden Hohlräumen der Schwanzwurzel liegen; sie können ausgestülpt werden und sitzen dann seitlich der Kloake an. Sie haben auf der Unterseite eine, von der Kloake herkommende gewundene Furche als Samenrinne; die Schlangen haben am Endteil Stachelbesatz. Sie entwickeln sich embryonal ausgestülpt. Schwellkörper fehlen ihnen; die Ausstülpung geschieht durch Muskeln. Stets wird nur einer von ihnen gebraucht, je nach der Seite, von welcher das Tier dem ♀ aufsitzt. — Bei Schildkröten und Krokodilen ist der Penis unpaar, und in der Körpermittellinie gelegen; hinter der vorragenden Ausführungsrinne für Harnblase und Samenleiter laufen 2 Gewebswülste nebeneinander, oben eine Rinne bildend, an der Vorder-

und Unterwand der Kloake entlang nach hinten; sie bilden einen durch Schwellkörper nach vorn aufrichtbaren Penis mit Samenrinne. Bei Schildkröten führt bereits auch die Harnrinne in die Samenrinne. — Die weiblichen Reptilien haben auch die Penisbildung ihrer Männchen, aber wesentlich kleiner (Clitorisbildungen).

2n) Geschlechtsunterschiede. Die Geschlechtsunterschiede sind bei Reptilien nicht bedeutend. Bei den meisten erwachsenen Eidechsen-♂ ist die Schwanzwurzel hinter dem After stark rübenartig verdickt (durch die darunterliegenden Penes). — Bei vielen Eidechsen haben nur ♂ Präanalporen. Bei mehreren Chamaeleon-Arten sind nur die ♂ gehörnt, die ♀ nicht; bei anderen Chamäleon-Arten aber sind beide Geschlechter gehörnt; bei noch anderen sind die ♀♀ zuweilen gehörnt, zuweilen nicht (Chamaeleon fischeri; Trn.). — Kleinere Geschlechtsunterschiede in der Färbung (z. B. Lacerta agilis: ♂ an den Seiten grün, ♀ braun), oder durch abweichende schmälere und längere Form des ♂-Schwanzes (Agamen), kommen häufiger vor. — Bei Schildkröten ist nur bei den ♂ der Bauchschild gewöhnlich unterseits ausgehöhlt, zum besseren Haften auf dem ♀.

3. Geschlechtsprodukte und Embryologie. Alle Reptilien bilden im Mutterleib festschalige Eier aus, und die Embryonalentwicklung findet in der Eischale statt (3 Ausnahmen weiter unten). Die Eier werden im Muttertier befruchtet und durchlaufen dort noch alsbald die ersten Stadien der Entwickelung, werden darauf entweder an feuchten Stellen oder in trockener Erde abgelegt, oder an Baumzweige angeklebt (Geckonen), wo sie durch die Sonnen- oder Lagerortswärme ausgebrütet werden; oder sie verweilen (bei recht vielen Arten) solange im Eileiterunterende (Uterus), daß entweder schon vor der Ablegung oder kurz nachher die ausgereiften Jungen die Eischale durchschneiden und auskriechen. Die Tiere sind alsdann ovo-vivipar, d. h. lebendig gebärend aus dem Ei (Blindschleiche, Kreuzotter, Seeschlangen, Lacerta vivipara; während Lacerta agilis die Eier unentwickelt ablegt; und ähnlich sind Chamaeleon jacksoni und bitaeniatus lebendiggebärend gegen Chamäleon dilepis und vulgaris, die Eier legen. Trn.). Die Zahl der Eier ist bei verschiedenen Arten sehr verschieden, immer aber nur gering; von 2 bis 30 bei den Schildkröten-Arten; von 10 bis 50 bei Schlangen-Arten. — Größere Brutpflege findet nicht statt (Pythonweibchen liegen auf ihren Eiern zusammengerollt; Krokodile sollen die Eier bewachen und den Jungen beim Auskriechen aus der Erde helfen). — Bei Trachysaurus und Tiliqua wird eine Ernährung der Embryonen vom Muttertier mittels des Dottersacks, und bei dem Scinciden Calcides mittels der Allantois angegeben; also wären diese Tiere uteripar. — Die Jungen sind oft in Färbung und Zeichnung von den Alten stark abweichend (Eremias lugubris, Lacerta viridis), sonst aber schon wie diese gebaut, nur natürlich ohne Geschlechtsreife.

Die Eier sind verhältnismäßig groß; bis über hühnereigroß bei Krokodilen. Sie bestehen aus Eischale; Eischalenhaut darunter; weißem Dotter und aus sehr großer gelber Dotterkugel. Die Eischale ist entweder eine pergamentartige Hülle (meiste Eidechsen) oder eine harte Kalkschale (Krokodile, Schildkröten und manche Geckonen). Sie ist porös, so daß Luft und, bei pergamentigen wenigstens, auch Wasser hindurchtreten kann, denn diese können zusammentrocknen. Die Dotterkugel ist durch Hagelschnüre (Chalazen) in der Eilängsachse an der Schalenhaut befestigt; diese gestatten jedoch der Dotterkugel bei Drehung des Eies ihren animalen Pol, d. h. embryobildenden Teil, immer wieder nach oben zu wenden. Die gelbe Dotterkugel (Eizelle) ist umhüllt von der Dotterhaut und trägt oben die Keimscheibe (Embryonalschild); zuerst als hellen bläschenartigen Fleck. Zellfurchungen finden nämlich nur in der Keimscheibe statt, die davon ihren Namen hat (diskoidale Furchung); die Dotterkugel hat also nur Teilentwicklung (Meroblastie). Die Keimscheibe umwächst später den Dotter als Dottersack; noch später sinkt der in ihrem Zentrum entstehende

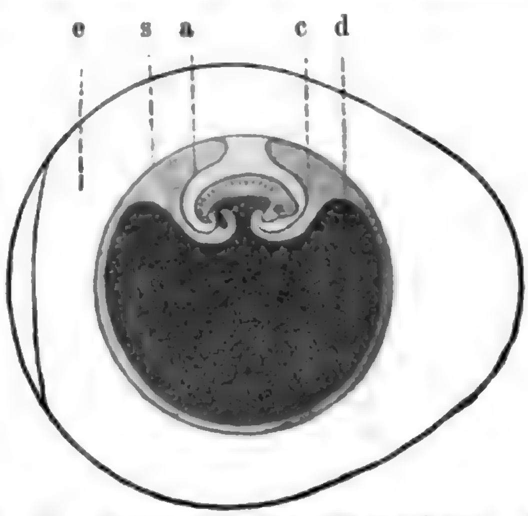


Fig. 19. Schematische Entstehung des Amnions. a Amnionblatt, c Hohlraum der Amnionfalte, d Dotterkugel, e Eiweißschichte, s Serosablatt der Amnionfalte. Der Dottersack und der Darmkanal sind durch dunklen Ton bezeichnet. Nach Ziegler.

Embryo von oben in den Dotter ein, es entstehen Keimscheibenfalten um ihn, die darauf über ihm zusammenwachsen und so

2 Hüllen darüber bilden: das äußere Hüllblatt, Serosa, und das innere, Amnion (Fig. 19). Zur Atmung des Embryos dienen zuerst die Blutgefäße des Dottersacks, die gleichzeitig auch Dotter dem Embryo zuführen; dann aber ein besonderes Organ, die Allantois, die als Blasenbildung vom Enddarm her zwischen Serosa und Amnion hineinwächst. Sie legt sich später mit der Serosa zusammen der Schalenhaut an und nimmt durch ihre Gefäße Sauerstoff auf. Die Weiterentwicklung des Embryos (Fig. 20 u. 21) ge-



Fig. 20. Lacerta muralis. Embryo mit länglichem Blastoporus und aufwachsenden Medullarwülsten. b Blastoporus, a vordere Amnionfalte, w Medullarwülste. Nach Will. Aus Ziegler.

schieht dann durch Bildung des Blastoporus mit Dotterpfropf; von Medullarwülsten, die zusammenfließen; durch Zusammenwachsen des Ektoderms hinter dem Blastoporus und Bildung einer Primitivplatte mit Primitivrinne, die angeblich zum Canalis neurentericus wird. Der Embryo



Fig. 21. Lacerta muralis. Aelterer Embryo. a vordere Amnionfalte, welche den Kopfteil des Embryo schon überwachsen hat, cn Canalis neurentericus, p Primitivrinne. Das Medullarrohr ist größtenteils schon geschlossen. Nach Will. Aus Ziegler.

entwickelt später Kiemenspalten, es befinden sich aber daran weder äußere noch innere Kiemen; die Kiemenbogen verschwinden bald wieder. Auch besitzt der Embryo zuerst Vornieren, dann Urnieren (Zwischennieren, Trn.), aus denen sich die Nach- oder Dauernieren zum Schluß entwickeln. Von den Vornieren bleiben bei Erwachsenen nur die Ausführungsgänge als Ovidukte erhalten, und deren männliche Gegenstücke als Wolffsche Gänge; von den Urnieren Reste beim ♂ als Nebenhoden und Samenleiter; beim ♀ Reste als Müllersche Gänge. — Das im Dottersack liegende Material wird zum Schluß in den Darm aufgenommen, der Dottersack verschließt dabei den Nabel des Tieres.

4. Systematik und Phylogenie. [Die lebenden Reptilien werden, wie schon erwähnt wurde, in 5 Ordnungen eingeteilt:

Ordnung 1: Rhynchocephalia. Fam. Hatteriidae (= Sphenodontidae), Art: Hatteria punctata (= Sphenodon punctatum). In den wichtigsten anatomischen Charakteren mit den Eidechsen übereinstimmend: So zuerst im Schultergürtelbau; Vomer, Palatinum und Pterygoid ferner bilden zwar ein sekundäres Gaumendach, die Naslöcher münden aber noch ganz vorn aus; Craniicolumella ist vorhanden; Kloakenspalt steht quer; ferner im Bau der Lungen; Foramen parietale ist auch hier vorhanden; und die Zähne sind akrodont. — Sonstige Charaktere: Pupille senkrecht; Unterkieferäste durch Bänder verbunden (wie bei Schlangen); 2 Schläfenbogen vorhanden; Quadratum mit dem Schädel verbunden und Bauchrippen mit Bauchsternum (wie bei Krokodilen); an den Brustrippen Processus uncinati (wie Krokodile und Vögel). Begattungsorgan bei ♂ fehlend. Wirbel amphicöl; an Hals und Rücken dazwischen unten Intercentra. In der Handwurzel 1—2 Centralia und Carpale 4 und 5 noch ungetrennt.

[Die Bezeichnung der Rhynchocephalia als Prosauria läßt sich — für Hatteria wenigstens — nicht aufrecht halten; „primitiver“ als bei Sauriern ist bei ihr nur das Fehlen des männlichen Begattungsorgans und die Verbindung der Unterkieferäste durch Bänder; durch Besitz eines sekundären Gaumendachs und durch feste Verbindung des Quadratums mit dem Schädel geht sie aber weit über dieselben hinaus. Die angeblichen Uebergangscharaktere ferner zu anderen Reptilien-Ordnungen sind nur Analogien (denn in ihrem sekundären Gaumendach z. B. sind die Maxillaria nicht mit enthalten, und auch das Bauchsternum hat anderen Bau wie bei Krokodilen. Wahrscheinlich ist die Hatteria sogar nur als Familie (Unterordnung) den Sauriern anzufügen.]

Hatteria lebt zurzeit nur noch auf der Insel Plenty Bay an der Nordinsel von Neuseeland.

Ordnung 2: Sauria (Lacertilia), Eidechsen. Unterschiede von den Schlangen sind: Haben mehr wie eine Längsreihe von Bauchschildern. Quadratum dem Schädel nur ganz schwach beweglich ansitzend; Unterkiefer vor den Oberkiefer nicht vorschiebbar. Unterkieferäste fest miteinander verwachsen, Augen gewöhnlich mit Augenlidern; das Parietalauge zumeist sehr deutlich; und auch zumeist Trommelfell. Am Skelett der obere Schläfenbogen vorhanden. Cranii columella vorhanden. Zähne nicht pfriemenartig lang, und aufrecht stehend. — Etwa 2000 lebende Arten

bekannt. — Wichtige Familien: Fam. Geckonidae (Ascoloboten). Zumeist an Wänden, Baumstämmen und Felsen kletternde, deshalb mit Haftapparaten für Luftdruck versehene Eidechsen (bei vielen: Hautfalten — „Lamellen" — mit Borstenbesatz unter den Zehen; bei Lygodactylus picturatus auch unter der Schwanzspitze; (Trn.), und desgleichen auch bei Diplodactylus palmatus; (Lorenz Müller); oder das ganze Tier ist oben und unten platt und hat Haftlappen am Körper, Schwanz und selbst am Kopf. Derart extrem ist: Ptychozoon homolocephalum). Gattungen: Gymnodactylus; Gonatodes; Hemidactylus; Lygodactylus (Art: picturatus tagüber schwärzlich, nachts Kopf schwefelgelb mit schwarzen Tupfen; Zapf); Tarentola (Art: mauritanica, auch in Südwesteuropa). — Fam. Pygopodidae: Schlangenartige Eidechsen. Die Haut wird in Fetzen abgeworfen. Vorwiegend Australien. Gatt. Pygopus, Flossenfuß. — Fam. Agamidae: Altwelttiere; Kopfschuppen klein, höchstens ein großes Interparietalschild (Occipitalschild, Blgr.) umfaßt das Scheitelauge. Zunge dick, fleischig, wenig vorstreckbar. Gebiß akrodont; oft in Schneide-, Eck- und Backzähne gesondert; Rückenkamm und Kehlsack finden sich häufig. Zumeist Insektenfresser, wie Eidechsen sonst; aber Uromastix, Lophura, Liolepis leben von Blättern und Früchten. — Gatt. Draco: die Rippen stark verlängert und dadurch an jeder Körperseite eine mächtige Hautfalte erzeugend, die durch die Rippen ausgebreitet und zusammengefaltet werden kann. Die Färbung dieser, als Fallschirm dienenden Hautfalten erinnert stark an die von Schmetterlingsflügeln; ♂ oft mit Kehlsack, der durch das Zungenbein senkrecht ausdehnbar ist und leuchtende Farben zeigt. Art: Draco volans auf Malakka und Java. — Gatt. Calotes: Baumagamen mit sehr lebhaftem Farbwechsel. — Gatt. Agama: Körper platt, Wüsten- und Steppentiere; oft prächtig in Färbung und Farbwechsel. — Gatt. Phrynocephalus: In Steppen Zentralasiens. Einige Arten auf dem Rücken mit intensiver Wüstenschutzfärbung, wedeln beim Laufen aber mit hocherhobenem Schwanz, dessen Unterseite leuchtend weiß- und schwarzstreifig ist. — Gattungen Physignathus, Chlamydosaurus, Amphibolurus laufen streckenweise aufrecht, aber Hinterbeine dabei unter Horizontalbewegungen der Oberschenkel weit ab vom Körper tätig. — Gatt. Uromastix, Dornschwanz: mit plumpem Kopf, flachem Körper, bedorntem Schwanz und lebhaftem Farbwechsel. Nordafrika und Indien. — Gatt. Moloch (horridus) mit ungemein großen Dornen am ganzen Körper und besonders je einem horizontalstehenden an den Seiten einer mächtigen Hautquerrolle des Nackens; durchaus harmlos; lebt von Ameisen; in Steppen Süd- und Westaustraliens. — Fam. Iguanidae, Leguane: pleurodont, sonst wie Agamen, welche durch sie in Amerika in Parallelformen vertreten werden. Viele haben Haftlamellen an den Füßen, gleich den Geckonen — Gatt. Anolis: Springende Baumbewohner mit lebhaft gefärbtem, senkrecht ausdehnbarem Kehlsack. — Gatt. Basiliscus: bei ♂ zumeist auf dem Hinterkopf ein mächtiger, nach hinten gerichteter Knorpelfortsatz; laufen vorwiegend auf den Hinterbeinen, aber mit typischer Eidechsbewegung derselben. Art.: Basil. americanus mit mächtigem Rücken- und Schwanzkamm, der durch die außerordentlich verlängerten Dornfortsätze der Wirbel gestützt wird (ein Beweis dafür, daß die riesigen Dornfortsätze des paläontologischen Naosaurus auch nur einem gleichartigen Hautkamm als Basis dienten, und nicht — wie Jaekel will — zum Schutz des Trägers bajonettartig gekreuzt wurden; was auch schon die Gelenkfortsatzgelenke des Naosaurus ganz ausschließen, die den Rückenwirbeln nur senkrechte Auf- und Niederbewegung aneinander und nicht Drehungen um die Längsachse gestatten. Trn.). — Gattungen Metapoceros von Cuba, Amblyrhynchus von den Galaposinseln und Iguana aus Südamerika haben Arten von weit über Meterlänge und mit vorwiegend pflanzlicher Nahrung. — Fam. Anguidae, Wirtelechsen: Schläfengrube knöchern überdacht; am Körper unter den Hautschuppen ein Knochenpanzer aus kleinen aneinanderstoßenden Plättchen gebildet; Art: Anguis fragilis, Blindschleiche: drehrund, gliedmaßenlos, glattschuppig, vorwiegend von Regenwürmern lebend; auch in Deutschland zuhause. — Fam. Helodermatidae, Krustenechsen: 2 Arten mit giftigem Biß. — Fam. Varanidae, Waranechsen: Zunge sehr lang, tief gespalten, in eine Scheide zurückziehbar; Hals lang, aufrichtbar; Gebiß pleurodont; Kopf mit keinen Schildern bedeckt; am Rücken große runde Schuppen von kleinen ringförmig umgeben; kräftige, als Haustier-, Eier- und Mehlfresser sehr gefürchtete Altweltbewohner. — Fam. Tejidae: Die Warane in Amerika vertretend. — Fam. Amphisbaenidae, Doppelschleichen: schlangenartig gestreckte Eidechsen zumeist ohne Gliedmaßen; Haut durch Längs- und Querfurchen in rechteckige, in Querrichtung aneinanderstoßende Felder geteilt, die durch Hautquerfurchen Hautquerringe bilden; Schwanz kurz, Augen verkümmert oder fehlend. Schnauzenspitze mit mächtiger Hornbeschilderung, zum Wühlen im Boden, wobei sie sich auf eine Bruststelle stützen, die oft durch Hautschilderbesatz dazu vorbereitet ist (Trn.); leben vorwiegend von Termiten und Ameisen, in deren Haufen sie wohnen. Cranii columella fehlt, ebenso der Schläfenbogen (Analogie, nicht Homologie, mit Schlangen, da hier Schnauze und Unterkiefer von Eidechsenbau). Trommelfell fehlt. Bewegen sich durch Schlängelungen in der Senkrechten fort und kriechen dabei vor- wie rückwärts. — Fam. Lacertidae (Lacerta agilis, vivipara und viridis auch in Deutschland), und Scincidae mit zahlreichen Gattungen und Arten (dazu Acontias). — Familien Anelytropidae (Gatt.: Feilinia), Ophiosepsidae und Dibamidae ganz schlangenartig gestreckt. — Fam. Chamaeleontidae (= Unterordnung Vermilinguia oder Rhiptoglossa nach Blgr. und Werner): Bewohner von Zweigen, die sie mit Klammerfüßen umgreifen, vorn die 3 inneren Zehen den 2 äußeren gegenübergestellt, hinten die 2 vorderen, den 3 äußeren; Körper seitlich stark zusammengedrückt und durch Aufblasen der Lungenfortsätze bis zur Durchsichtigkeit verschmälerbar; Zunge zylindrisch, durch Muskelwirkung vorschleuderbar, und mit klebrigem Sekret Insekten anleimend und fangend; kein Trommelfell; beide Körperseiten neuromotorisch ganz unabhängig voneinander, so daß die Augen und Hautchromatophoren der beiden Kör-

perseiten gleichartig oder gegensätzlich arbeiten können. Bewohner Afrikas, Arabiens und Vorderindiens. — Gatt. Chamaeleon: Schuppen an den Fußsohlen rundlich, flach und weich; Schwanz bei den meisten Arten zum Zweigumwickeln einrollbar (Bewohner von glattrindigen Zweigen?) bei vielen Arten ein vom Kehlkopf aus aufblasbarer Kehlsack, und gleichzeitig aufrichtbare Kopflappen vorhanden (Trn.). — Gatt. Brookesia: Sohlenschuppen stachlich und rauh; Krallen einfach; kein Wickelschwanz. — Gatt. Rhampholeon: Sohlenschuppen stachlich und rauh; jede Kralle in der Mitte mit einer zweiten, nach unten gerichteten Spitze; Schwanz nicht einrollbar. Diese beiden Gattungen sind wahrscheinlich Bewohner rauhborkiger Zweige; in die sie ihre Krallen einschlagen (Trn.).

Ordnung 3: Ophidia, Schlangen. Kiefer- und Gaumenknochen nur durch Bänder in Verbindung, daher sehr beweglich, besonders die Unterkieferäste gegeneinander. Da außerdem Quadratum und Squamosum am Schädel sehr beweglich und weit nach hinten ragend eingestellt sind, ist der Mund gewaltig ausdehnbar, zum Ganzverschlingen unverhältnismäßig großer Beutetiere, die nur von Tropidonotus lebend, sonst vorher durch Giftbiß getötet oder durch Umrollen erstickt, unter Einspeichelung durch Anhaken an die nach hinten gerichteten Oberkiefer- und Gaumendachzähne befestigt und durch abwechselndes Vorschieben der Unterkieferäste heruntergeschlungen werden, indem sich die Schlangen so gleichsam über die Beute hinüberziehen (Ausnahme die termitenfressenden Typhlopiden). Wegen der Ausweitungsfähigkeit des Unterkiefers unter demselben in der Ruhe eine Kinnhautfurche. — Augen unter durchsichtiger Augenkapsel. Zumeist nur eine einzige Bauchschilderreihe (Ausnahmen: Typhlopiden, Glauconiiden und Seeschlangen). Schläfenbogen stets fehlend. Transversum stets vorhanden. Unterhautknochen nie vorhanden.

Die Schlangen stammen nicht von den Sauriern ab. Die schlangenartigen Saurier, die Nachkommen 4füßiger Saurier, sind ihnen nur ana-, nicht homolog — Konvergenzformen —. Die Schlangen stehen besonders im Schädelbau der Stammform der Reptilien näher, als die Saurier (Trn.).

Die Schlangen können sehr lange hungern (Riesenschlange 1½ Jahr); aber auch auf einmal ungeheuere Massen vertilgen (Riesenschlange über 100 Pfd.). Ihre Verdauungskraft ist schnell und enorm, nur Haare, Federn und große Hornschilder bleiben unverdaut. Etwa 1800 lebende Arten bekannt. In heißen Gegenden haben einige Sommer-, in kalten andere Winterschlaf. — Fam. Typhlopidae, Wurmschlangen. Drehrunde, von Anfang bis Ende gleich dicke Erdschlangen, mit kurzem dickem Schwanz, verkümmerten oder fehlenden Augen; auf der Schnauzenspitze ein plattnagelartiges Hornschild zum Wühlen im Boden, in dem sie leben. Am Bauch keine große Bauchschilderreihe, sondern kleine Schuppen. Mund nicht erweiterungsfähig, Rachen eng; und nur die ganz quergestellten Oberkiefer bezahnt. Transversum fehlt; Pterygoid stößt weder an Quadratum noch Unterkiefer. Nur ein Beckenknochen als Hintergliedmaßenrest noch vorhanden. Mehrere Aftervorschilder (Praeanalschilder). Sehr viele Arten. Insektenfresser. — Fam. Glauconiidae. Wie vorige, aber nur Unterkiefer bezahnt. Das Becken ist weniger verkümmert wie bei allen Schlangen; die 3 Beckenknochen sind nachweisbar, und sogar Ischiumsymphyse; auch Spuren des Oberschenkels. Nur ein großes Aftervorschild. Viele Arten. Winzige Insektenfresser. — Fam. Boidae, Riesenschlangen. Unterkiefer mit Coronoid (fehlt Colubriden und Viperiden). Becken- und Hintergliedmaßenreste vorhanden, die Kralle eines Zehs jederseits neben dem After (Aftersporn). Pupille senkrecht. Nächtlich. 1. Pythoninae. Mit Supraorbitale. Praemaxillaria bezahnt. Schwanzschilder in 2 Reihen. Altweltliche Reptilien. — Gatt. Nardoa im Bismarckarchipel. — Gatt. Python. In den Ober- und Unterlippenschildern tiefe Gruben. Schwanz einrollbar. 2. Boinae. Kein Supraorbitalknochen. Keine Prämaxillarzähne. Unten am Schwanz meist nur eine Schilderreihe. — Gatt. Corallus. — Gatt. Eunectes, Anakonda. Wasserschlangen Südamerikas. — Gatt. Boa. — Gatt. Eryx. In Wüsten und Steppen der Mittelmeerländer; auch in Europa (Hämushalbinsel). — Fam. Colubridae. Keine Hintergliedmaßenreste. Prämaxillarzähne fehlen. Ober- und Unterkiefer stets bezahnt. Zerfallen in 3 Unterfamilien: 1. Aglyphae, Ungiftige. Mit einfachen, kegelförmigen Zähnen. 2. Opistoglyphae: Der letzte Oberkieferzahn ist stark verlängert und an der Vorderseite mit Längsfurche versehen, welche das Gift beim Biß in die Wunde leitet. 3. Proteroglyphae. Vorn oder am ganzen Oberkiefer stark verlängerte, festgewachsene Furchenzähne. — In allen 3 Unterfamilien zahlreiche Gattungen und Arten. Aglyphen: Gatt. Achrochordus, Wasserbewohner. — Gatt. Tropidonotus (Art. Trop. natrix, Ringelnatter, 7 Oberlippenschilder, 19 Schuppenreihen; Art. Trop. tessellatus, Würfelnatter, 8 Oberlippenschilder, 17 Schuppenreihen; Schwanzschuppen gekielt. Beide in Deutschland). — Gatt. Zamenis und Coluber; mehrere Arten auch in Europa. — Gatt. Coronella. Schuppen ohne Kiele; runde Pupille; große Schilder auf dem Hinterkopf. Art. Coron. austriaca; in Deutschland; wird häufig mit der Kreuzotter verwechselt. — Gatt. Dasypeltis, Art: Dasyp. scabra, Eierschlange. Zähne verkümmert. Zerdrückt Vogeleier in der Speiseröhre mit Hilfe der, durch dieselbe hindurchragenden Wirbelfortsätze Hämapophysen. Die Eierschalen werden ausgespieen, da der enge Mageneingang nur den Einhalt hindurchläßt. — Opistoglyphen: Gatt. Langaha, Baumschlange mit langem weichem Nasenaufsatz. Madagaskar. — Gatt.: Dipsadomorphus, Coelopeltis, Psammophis, Dryophis. — Proteroglyphen: Abteilung 1: Hydrophinae, Seeschlangen. Körper zumeist seitlich zusammengedrückt und mit spitzer Bauchkante. Schwanz seitlich stark zusammengedrücktes Ruderorgan mit stark verlängerten oberen und unteren Wirbelbögen und -dornen. Augen klein, mit runder Pupille. Schuppen klein, sich nicht deckend. Leben im Meer, an Küsten. Lebendig gebärend. — Gatt.: Hydrus, Distira, Enhydris und Platurus (letzte drehrund, Kopf- und Bauchschilder groß). — Proteroglyphen: Abteilung 2: Elapinae, Giftnattern. Sehr häufig in Australien (Gatt. Pseudelaps und Micropechis). — Afrikanische und asiatische Gattungen sind

Naja, Brillenschlange. Hals wird aufgerichtet und durch Abspreizen der Rippen schildartig erweitert. — Art: Naja nigricollis, Speischlange. Speit dem Angreifer nach den Augen, die getroffen schweren Entzündungen anheimfallen. — Art: Naja tripudians, Brillenschlange; in ganz Südost-Asien. Auf dem Halsschild brillenartige Zeichnung. — Gatt. Doliophis. Die Giftdrüsen reichen vom Mund bis in die Mitte des Bauches. — Gattung Elaps, Korallennatter; schwarz und rot; oder schwarz, rot und gelb geringelt. Tropisches Amerika. — Gatt. Dendraspis, schwarze Mamba. Im tropischen und in Süd-Afrika. Aeußerst gefährlich. Fam. Viperidae, Vipern. Oberkiefer stark verkürzt, mit langem Giftzahn, der durch einen Giftkanal durchbohrt wird. Der Zahn liegt in der Ruhe nach hinten dem Gaumendach angelegt, wird vom Quadratum aus durch Pterygoid und Transversum zwangsläufig vor dem Biß beim Mundöffnen aufgerichtet (O. Thilo). Daneben zahlreiche Ersatzgiftzähne am Oberkiefer. Zumeist lebend gebärend. — 1. Unterfam. Viperinae. Ohne Grube in der Oberlippe zwischen Nasloch und Auge. In Europa, Asien und Afrika. — Gatt. Causus. — Gatt. Vipera (Art: berus, Kreuzotter, in Deutschland. Als nur Mäuse und Eidechsen fressendes Reptil sehr nützlich; beißt unbelästigt nicht, sondern entflieht). — Gatt. Bitis. Gewaltige Vipern Afrikas. — 2. Unterfam. Crotalinae. Mit tiefer Grube in der Oberlippe zwischen Nasloch und Auge. — Gatt. Ancistrodon; Lachesis; Crotalus (Klapperschlange; mit Rassel aus nicht gehäuteten Schwanzspitzenschildern).

Ordnung 4: Chelonia, Schildkröten. Mit knöcherner Rücken- und Bauchschale und zahnlosen, zumeist mit Hornscheiden überzogenen Kiefern. — 1. Unterordnung: Athecae (Sphargoidea), Lederschildkröten. Panzer aus kleinen, mosaikartig aneinanderliegenden Knochenplatten gebildet. Wirbel und Rippen nicht mit dem Panzer verwachsen. Füße flossenartig, ohne Krallen. — Fam. Sphargidae. Art: Sphargis (Dermochelys) coriacea. Auf der Rückenschale 7 Längskiele, unten 5. Wird bis 2 m lang. In allen Meeren. — 2. Unterordnung: Thecophora: Rücken- und Bauchschale aus großen Knochenplatten gebildet. — Abteilung Pleurodira. Schalen mit Hornschildern. 4 bis 5 Finger mit Krallen. Brustschild in direkter Verbindung mit den Randschildern. 13 Bauchschilder und darunter ein Intergularschild. Becken mit Rücken und Bauchschale verwachsen. Kopf legt sich zum Schutz unter Zurückziehung und Horizontalbewegung des Halses seitlich unter die Schale. — Fam. Pelomedusidae. Hals ganz zurückziehbar. Süßwasserschildkröte Süd-Amerikas und des tropischen Afrika. — Gatt. Sternothaerus. Vorderlappen der Bauchschale nach oben aufklappbar. Afrika. — Gatt. Pelomedusa. Vorderlappen des Brustschildes nicht aufklappbar. Ebenda. — Fam. Chelydidae. Hals nicht zurückziehbar, nur seitlich anzulegen. Süßwasserschildkröte in Südamerika, Australien und Neuguinea. — Gatt. Chelys (fimbriata). Kopf und Hals mit Hautlappen. — Gatt. Chelodina, australische Schlangenhalsschildkröte; wegen des langen Halses benannt. — Abteilung Cryptodira. Hals unter s-förmiger senkrechter Biegung einziehbar. Schale mit Hornschildern bedeckt. Finger mit Krallen. Brustschilder von den Randschildern der Rückenschale durch eine Reihe Zwischenschilder (Inframarginalia) getrennt. Becken in fester Verbindung mit dem Panzer. — Fam. Testudinidae. Nackendeckplatte mit rippenähnlichen Seitenfortsätzen. Hals vollständig zurückziehbar. — Gatt. Testudo. Zehenhaut bis zu den Nägeln verwachsen. Nur je 2 Zehenglieder. Unterarm an Außenseite mit vergrößerten Schuppen. Art: T. graeca, griechische Landschildkröte; Balkanhalbinsel, Südungarn, Italien. — Art: T. marginata, Griechenland. — Auch die Riesenschildkröte der Galopagosinseln und der Inseln an der Ostküste Afrikas gehören hierher, mehrere Zentner wiegend und mehrere Jahrhunderte alt werdend. — Gatt. Emys: Bauchpanzer beweglich und Rückenschale schwach gewölbt. Art: E. orbicularis; dunkel mit gelben Flecken und Stricheln. Auch in Deutschland (Mark Brandenburg, Provinz Westpreußen). — Fam. Chelydridae. Bauchschale klein, kreuzförmig. Art: Chelydra serpentina, Alligatorschildkröte, Nordamerika. Schwanzunterseite mit großen Schildern bedeckt. Augen hoch oben auf dem Kopf. — Fam. Chelonidae. Gliedmaßen Ruderflossen; die vorderen viel länger als die hinteren; Zehen unbeweglich und fest untereinander verbunden, nur eine oder 2 haben Krallen. Große Lücke in der Bauchschildmitte. Hals unvollständig zurückziehbar. Große Schildkröte in allen tropischen und halbtropischen Meeren. Ausgezeichnete Schwimmer. An Land nur beim Eiablegen im Küstensande. Eine Reihe von Inframarginalschildern vorhanden. Art: Chelone mydas, Suppenschildkröte. Kiefer nicht hakenartig gebogen, Gliedmaßen mit je nur einer Kralle. — Art: Chel. imbricata, Karettschildkröte. Schnauze hakenartig gebogen; Rückenschild hinten ausgezackt. Gliedmaßen mit je 2 Krallen. Liefert Schildpatt. Besonders bei Neuguinea und Bismarckarchipel heimisch. — Gatt. Thalassochelys, 5 oder mehr Rückenschilder vorhanden. — 3. Unterordnung: Trionychidea. Fam. Trionychidae. Schale ohne Hornschilder, bedeckt mit weicher lederartiger Haut; Hals in senkrechter Ebene s-förmig vollständig zurückziehbar. Becken mit Schalen nicht fest verbunden. Nur 3 innerste Zehen haben Krallen; Zeh 4 mit 4 oder mehr Gliedern. Kiefer mit fleischigen Lippen. Schnauze in Rüssel verlängert. Flußschildkröten Afrikas, Asiens und Nordamerikas. — Gatt. Trionyx, Cycloderma usw.

Ordnung 5: Crocodilia (Emydosauria, Hydrosauria), Krokodile. Von Eidechsengestalt. Schwanzkörper lang, seitwärts zusammengedrückt. Vorderfüße 5 zehig, hinten 4 Zehen durch Schwimmhaut verbunden. 7 Gattungen. — Gatt. Gavialis. Schnauze sehr lang und schlank. Wenigstens 15 Zähne stehen vor der hinteren Verwachsstelle der beiden Unterkieferäste, und an dieser Stelle vereinigen sich auch die Splenialknochen. Art: G. gangeticus. Nasalia sehr klein, vom Nasloch durch die Zwischenkieferknochen und die Maxillaria weit getrennt. Fischnahrung. Nordindien. — Gatt. Tomistoma wie vorher, aber Nasalia lang, in Verbindung mit den Zwischenkieferknochen, die sie von dem Nasloch noch trennen. Sundainseln. — Mecistops. Schnauze mittellang. 7 bis 8 Unterkieferzähne vor der hinteren Unterkieferverwachsstelle, an welche

die Splenialknochen gerade anstoßen. Auch hier halten noch die Zwischenkieferknochen die Nasenbeine vom Nasloch fern. — Art: Mecistops cataphractus. Westafrika. — Gatt. Crocodilus. Schnauze nur mäßig lang. Hintere Verbindungsstelle der Unterkieferäste reicht nicht über die 4 bis 5 vordersten Zähne hinaus, und die Splenialknochen reichen nicht an diese Naht. Der vierte Unterkieferzahn paßt in eine seitliche Grube am Oberkiefer. Die Nasenbeine stoßen direkt an das Nasloch, wie bei den folgenden. Ohne knöcherne Nasenscheidewand. Art: Cr. niloticus, Afrika; Cr. porosus, Asien. — Gatt. Osteolaemus wie Crocodilus, aber mit knöcherner Nasenscheidewand. Art. Osteol. tetraspis, Westafrika. — Gatt. Caiman wie Crocodilus, aber vierter Unterkieferzahn paßt nicht in seitliche Oberkiefergrube, sondern geht in ein Loch im Gaumendach. Ohne knöcherne Nasenscheidewand. Mit knöchernem Bauchpanzer. Zentral- und Südamerika — Gatt. Alligator, wie Caiman, aber eine knöcherne Nasenscheidewand. Kein knöcherner Bauchpanzer. Art: A. mississippiensis. Südosten von Nordamerika; Art: A. sinensis im Jantsekiang, als einziger Altweltalligator.

Literatur. **G. A. Boulenger,** *Catalogue of Lizards. London 1885 u. 1887.* — **Derselbe,** *Catalogue of Snakes. London 1893, 1894 u. 1896.* — **Derselbe,** *Catalogue of Chelonians, Rynchocephalia and Crocodiles. London 1889.* — **B. Duerigen,** *Deutschlands Amphibien und Reptilien. Magdeburg 1897.* — **H. Gadow,** *Amphibia and Reptiles. Cambridge 1901.* — **C. Gegenbaur,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Leipzig 1898 bis 1901.* — **B. Haller,** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. Jena 1904.* — **O. Hertwig,** *Handbuch der Entwickelungslehre der Wirbeltiere. Jena 1901 bis 1906.* — **C. K. Hoffmann,** *Reptilien. Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs. Leipzig-Heidelberg 1873 bis 1878.* — **Schreiber,** *Herpetologia europaea, Jena 1912.* — **G. Tornier,** *Die Kriechtiere Deutsch-Ost-Afrikas. Beiträge zur Systematik und Deszendenzlehre. Berlin 1897.* — **Fr. Werner,** *Das Tierreich. III. Reptilien und Amphibien. Leipzig 1908 (systematischer Teil brauchbar).* — **R. Wiedersheim,** *Vergl. Anatomie d. Wirbeltiere, 7. Aufl. Jena 1909.* — **K. v. Zittel,** *Grundzüge der Paläontologie. II. Abt. Vertebrata-Reptilia, bearb. d. F. Broili. München und Berlin 1911.*

Gustav Tornier.

Reptilia.
Paläontologie.

1. Ordnung Anomodontia (= Theromora). 2. Ordnung Ophidia, Schlangen. 3. Ordnung Lacertosauria, Eidechsen. 4. Ordnung Rhynchocephalia, Krummschnauzechsen. 5. Ordnung Ichthyosauria, Delphinechsen. 6. Ordnung Sauropterygia, Schlangenhalsechsen. 7. Ordnung Parasuchia, Nebenkrokodile. 8. Ordnung Crocodilia, Hauptkrokodile, Krokodile. 9. Ordnung Pterosauria, Flederechsen. 10. Ordnung Chelonia, Schildkröten. 11. Ordnung Dinosauria, Groß-, Drachen- oder Gespensterechsen.

Für die Abfassung dieses Artikels galten die folgenden Gesichtspunkte: Die ausgestorbenen Reptilien sind entweder unmittelbar in die zur Zeit noch lebenden Ordnungen einzufügen, oder sie bilden zwar selbständige Ordnungen, weichen dann aber doch keineswegs von den derzeitigen Ordnungsvertretern dermaßen ab, daß eine, ihrer eigentlichen Beschreibung vorangehende Erklärung ihres Baues notwendig wäre; es sei daher in bezug auf das den Reptilien Gemeinsame auf den Artikel „Reptilien“ dieses Handbuchs verwiesen. Auch seien auf die in jenen Artikel eingestreuten Auseinandersetzungen über Schultergürtelbau und die in das paläontologische Gebiet hinübergreifenden Auseinandersetzungen über Phylogenese und Biologie, so z. B. auf die Bemerkungen über die phylogenetische Stellung der Rhynchocephalen, die Biologie des Naosaurus u. a. hingewiesen, denn aus Mangel an Raum wird dies hier nicht wiederholt. —

Man teilt die paläontologischen Reptilien mitsamt den gegenwärtigen bisher in 10 bis 11 Ordnungen ein.

1. Ordnung Anomodontia (= Theromora und Theromorpha). Hauptcharaktere (Fig. 1 bis 16). Die Schläfengegend ist entweder völlig von Knochen überdacht (Fig. 2 bis 4), oder es ist jederseits nur ein oberes Schläfenloch vorhanden (Fig. 5 bis 7). Das Quadratum ist starr mit dem Schädel verbunden. Die Pterygoidea gehen bis an das Quadratum. Gesonderte Craniicolumellae (Ektopterygoidea) fehlen. Der Unterkiefer ist stets aus mehreren Knochen zusammengesetzt. Die Wirbel sind tief bikonkav (amphicoel). Atlas und Epistropheus sind verwachsen. Die Vorder- und Hintergliedmaßen sind fünfzehig. Aus dem oberen Karbon, Perm und Trias stammen die Vertreter. — Den meisten derselben kommt ferner zu: Oben im Schädeldach ist gewöhnlich ein Scheitelaugenloch (Foramen parietale) vorhanden (Fig. 9). Die Zähne sind entweder der Kieferkante aufgewachsen (acrodont) oder in Gruben der Kiefer fest angewachsen (protothecodont). Die Außennaslöcher liegen zumeist ganz vorn an der Schnauzenspitze, voneinander getrennt oder vereinigt. Der Hinterhauptshöcker bietet alle Zwischenstufen zwischen einem einheitlichen Knopf, der fast ganz durch das Suboccipitale gebildet wird, zu einem dreilappigen Knopf, in dem Sub- und Latroccipitalpartien vereinigt sind, bis zu einem nierenförmigen oder Doppelknopf, in dem dann der mittlere oder Suboccipitallappen zum Teil oder ganz verschwunden ist. Die meisten Rippen, besonders die des Halses, sind zweiköpfig, und haben dann den einen Kopf dem Neuralbogen angeheftet, während der zweite entweder mit dem Wirbelkörper gelenkt oder mit einem Intervertebrale, oder —

wenn diese fehlen — zwischen 2 Wirbeln. Der Oberarm ist gewöhnlich sehr massig (Fig. 2, 3 und 13) mit großen Fortsätzen versehen und trägt ein inneres Condyloidloch (Foramen durch lange Zeiträume. Ganz besonders ergiebige Fundstätten enthalten die Karroosandsteinformation Südafrikas und die entsprechenden Erdschichten Nordamerikas,



Fig. 1. Pareiasaurus Baini. Nach Hutchinson.

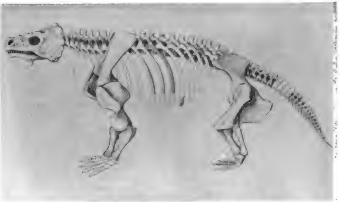


Fig. 2. Pareiasaurus serridens. Nach Broom.

entepicondyloideum). Das Achselbein ist entweder noch einheitlich verknöchert, oder in Schulterblatt, Inter- und Postcoracoid (Praecoracoid und Coracoid d. Aut.) gesondert. — Vertreter der Ordnung sind in großer Anzahl und sehr verschiedener Größe gefunden worden, sowie auch in weiter Ausdehnung über die Erde; und lebten auch Deutschlands, Rußlands und Indiens. Es waren Binnenlandtiere; und sie zerfallen nach der Ausbildung der Schläfenregion, des Gaumens und der Kieferbezahnung in die folgenden fünf Unterordnungen:

1. Unterordnung Cotylosauria. Schwerfällig gebaute Tiere (Fig. 1), mit völlig überknöchertem Schläfenbezirk. Die Schädel-

knochen sind dabei zumeist mit eigentümlichen Knochenauflagerungen und Gruben überdeckt (skulpturiert), zuweilen sogar mit Höckern, Knochenrunzeln und Spitzen ver- lange Skelett ist in München durch Broili aufgestellt (Fig. 3), der Schädel hat Knochenauflagerungen und eine hakenartig über den Unterkiefer herabhängende Schnauzenspitze, die

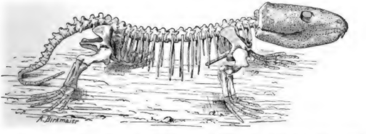


Fig. 3. Labidosaurus hamatus. Montiertes Skelett in der Münchener Sammlung. Nach Broili.

sehen. Das Scheitelaugenloch ist groß. Die Außennaslöcher liegen, getrennt voneinander, ganz vorn in der Schnauzenspitze, und die Augenhöhlen sind gewöhnlich auffällig groß, besonders dann, wenn dieselben unmittelbar mit der Schläfengrube verwachsen sind. Die Zähne stehen in einer oder mehreren Reihen auf den Kiefern. Die Wirbel sind tief bikonkav; die drei Achselbeinknochen häufig noch nicht voneinander getrennt; und die drei Hüftbeinknochen, d. h. Knochen jeder Beckenhälfte, miteinander verwachsen (Fig. 8). Das Pubis ist mit Foramen pubicum versehen; und die beiden Beckenhälften stoßen in der Körpermittellinie in einer langgestreckten Längsnaht aneinander. — Wie die Tiere selbst, ist der Schädel auch plump und massiv. Der Hals zumeist kurz; der Rumpf nur mittellang, der Schwanz mittellang oder kurz und vor allem sind die Gliedmaßen auffällig kräftig gebaut. Die Vorderbeine ferner besitzen außer dem einheitlichen Achselbein noch ein t-förmiges Episternum (= Interclavicula), Schlüsselbeine und Cleithren. Die Tiere selbst waren zumeist Strandbewohner (und Grabspezialisten für Vorder- und Hintergliedmaßen, Trn.) und werden je nach dem Gebiß für Fleisch- oder Pflanzenfresser gehalten. Sie sind hauptsächlich aus Süßwasserablagerungen des Perm, und zwar aus Texas, Südamerika usw. bekannt. — Auf Grund der Bezahnung werden sie in folgende drei Gruppen eingeteilt: Gruppe 1: An Ober- und Unterkiefer stehn die Zähne in nur einer Längsreihe und sind nicht in die Quere verbreitert: Familie Pareiasauridae (Fig. 1 bis 4 und 8).

Dazu gehören als Gattung: Seymouria. Schädel mit völlig überknöchertem Schläfengebiet, das von Ohrschlitzen durchbrochen wird. — Gattung Labidosaurus. Das etwa 70 cm

jederseits mit je 3 kräftig nach unten vorspringenden Zwischenkieferzähnen versehen ist. Im Oberkiefer ferner stehen je 17, ziemlich gleichartig gebaute, den Kieferknochen am Innenrand angewachsene Zähne. Der Unterkiefer hat 16 Zähne. Das Tier besitzt ein Transversum. 2 Kreuzbeinwirbel und zwischen den Wirbeln Intercentra. Die Gliedmaßen waren kräftig, der Oberschenkel hat mächtige Trochanteren. Die Tiere stammen aus dem Perm von Texas. — Gattung Pareiasaurus (Arten: Baini und serridens (Fig. 1 und 2); Skelette besitzen London, Kapstadt und Petersburg, einen Abguß davon hat München). Es sind Tiere von mächtiger Größe, nämlich bis 3 m lang, und ungemein plump. Der entsprechend plumpe und oben amphibienartig platte, dazu breite und kurze Schädel hat eine mit knöchernen Höckern und tiefen Gruben versehene Oberfläche. Die Zähne haben dicken Schmelzbelag und mit Spitzen versehene Ränder. Auch auf den Vomerbeinen, Palatinen und Pterygoiden saßen rückwärts gekrümmte Zähne in mehreren Längsreihen. Die Augen liegen seitlich am Schädel und sind nicht groß. Der Hinterhauptshöcker ist ein einfacher Knopf und wird durch das Sub- und die Latroccipitalen gebildet. Der Unterkiefer trägt am Kinn, und an jeder seiner Hälften in der Mitte unten einen kräftigen Knochenzapfen, die dem Schädel ein höchst auffälliges Ansehn verleihn. Die Achselbeine sind noch einheitliche Knochenplatten. Der Oberarm besitzt enorme Cristen und ein inneres Condyloidloch (Entepicondyloidforamen der Autoren). Pubis und Ischium sind zu einer breiten Masse vereinigt und umschließen kein Foramen pubo-ischiadicum, dagegen ist ein Foramen pubicum vorhanden. Am Pubis des Pareios. serridens ferner ist (nach Broom) der Innenrand unmittelbar unter dem Gelenk mit einem mächtigen, breiten, abgeplatteten Fortsatz versehen der abwärts gerichtet ist (Processus lateralis, Trn); und in der Fußwurzel gelenkt mit Tibia und Fibula ein mächtiger Knochen, der unter der Fibula von einem Foramen durchbohrt wird und das vereinigte Tibiale, Intermedium und Fibulare darstellt (Broom). Alle Gliedmaßen sind ungemein kräf-

tig; die Füße plantigrad, die Zehen durchweg scharf bekrallt. Der Schwanz ist kurz, hat aber 30 Wirbel und Hämapophysen (chevron bones) daran. Der Rücken hat 1 bis 3 Reihen plattenartiger Hautverknöcherungen. Fundort war das Perm in Südafrika. — Eine andere Gattung, sind: Der Schädel hat stets ein Scheitelaugenloch. Die vorn an der Schnauze liegenden Außennaslöcher sind voneinander getrennt. Nicht nur die Kiefer sondern auch die Gaumenknochen tragen Zähne (Fig. 12).

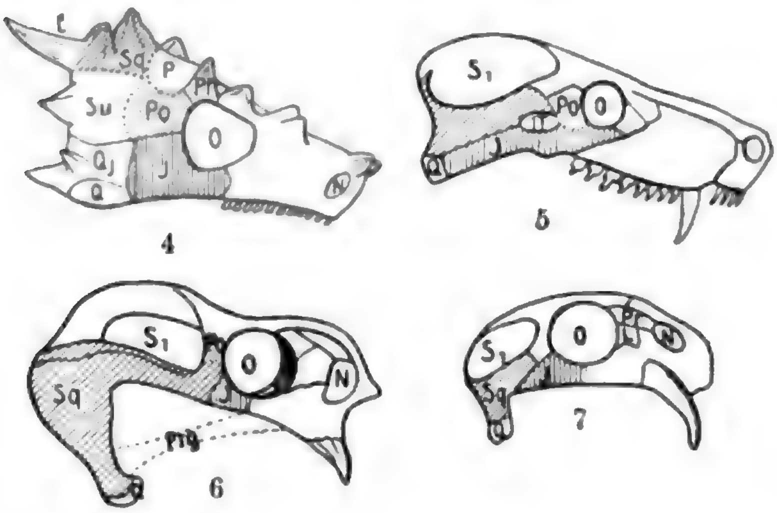


Fig. 4 bis 7. Schädelumrisse, um den Bau der Schläfenbogen und -löcher zu zeigen, 4 von Elginia, 5 Cynognathus, 6 Gordonia, 7 Dicynodon. E Epiothicum, J Jugale, It unteres Schläfenloch, L Lacrymale, N Nasale, O Auge, P Parietale, Pf Postfrontale, Po Postorbitale, Ptg Pterygoid, Q Quadratum, Qj Quadratojugale, Sq Squamosum, Su Supratemporale, S_1 oberes Schläfenloch. Nach Gadow.

Propappus, erinnert an Pareiasaurus, aber der Rücken war dicht mit Knochenplatten belegt; sie stammt ebenfalls aus Südafrika. — Bei der Gattung Elginia (Art: mirabilis Fig. 4 und 9) hat das Hinterhaupt am Hinterrande hornartige Knochenzapfen, die an die zurzeit lebende Eidechse Phrynosoma erinnern. Das Tier besitzt ferner feingezackte Zähne auf den Kiefern und kleinere in mehreren Längsreihen am Gaumen. Das Scheitelaugenloch (Fig. 9 Mitte) liegt weit vorn und fast zwischen den Augen. Die Vertreter stammen aus dem roten Sandstein der unteren Trias von Elgin in Schottland.

Gruppe 2: In den Kiefern stehn die Zähne in mehr als einer Reihe und sind nicht in die Quere verbreitert: Fam. Pariotichidae.

Gattung Pariotichus und Stephanospondylus: Letztere stammt aus dem mittleren Rotliegenden von Sachsen.

Gruppe 3: Sie hat die Kieferzähne in nur einer Reihe stehn, und sind dieselben in die Quere verbreitert: Fam. Diadectidae.

Gattung Diadectes: Die Zwischenkiefer tragen flach meißelförmige Zähne; die quer verbreiterten Oberkieferzähne haben jeder zwei ungleich hohe Spitzen. Die kurz vor dem Kreuzbein liegenden Wirbel zeigen Hyposphen-Hypantrum-Gelenke. Die Rippen 3 bis 5 sind am Unterende verbreitert, und die Rippen 6 bis 8 von knöchernen Haut platten bedeckt. Die Gattung stammt aus dem oberen Karbon und Perm Nordamerikas.

2. Unterordnung Pelycosauria. Die Hauptcharaktere der Vertreter (Fig. 10) sind: Sie stimmen mit denen der vorangehenden Unterordnung sonst überein, haben aber entweder nur eine untere, oder zwei übereinander liegende Schläfengruben und ein mehr spezialisiertes, besonders durch große Eckzähne ausgezeichnetes Gebiß. Sonstige Charaktere

Es sind Ossa transversa und Craniicolumellae (Epipterygoidea) vorhanden. Die Wirbel sind bikonkav, und zumeist liegen Intercentra dazwischen. Die 3 Achselbeinknochen werden selbständig angelegt und verwachsen erst im Alter. Die 3 Hüftbeinknochen sind verwachsen. Gut bekannte Arten stammen aus dem Perm in Nordamerika, Bruchstücke aus Europa.

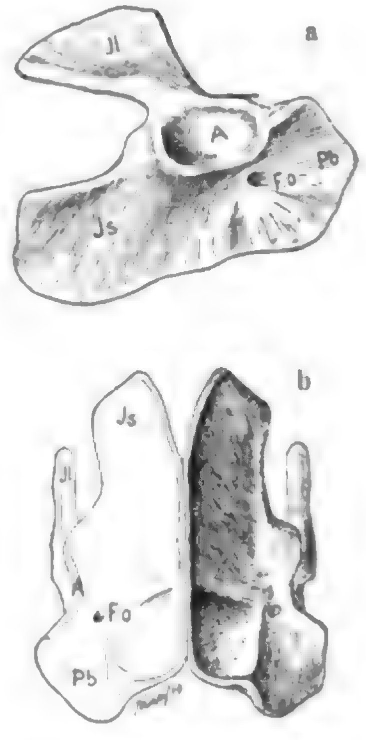


Fig. 8. Labidosaurus hamatus. Becken: a rechte Hälfte; b von unten. Jl Ilium, Js Ischium, Pb Pubis, A Gelenkpfanne für den Oberschenkel, Fo Foramen pubicum. Nach Zittel-Broili.

Sie zerfallen in 2 Familien: Familie 1 Poliosauridae. Diese haben niedrig gebauten, langgestreckten Schädel und zugespitzte Schnauze, niedrige Dornfortsätze und langen Schwanz. In der Gesamtgestalt erinnern sie an die zurzeit lebenden Warane, daher auch der Name der Gattung Varanosaurus. — Familie 2 Clepsidrophidae. Der Schädel ist seitlich zusammengedrückt und hat einen erhöhten Gesichtsabschnitt und eine mächtige Lücke zwischen Prämaxillare



Fig. 9. Schädeloberseite von Elginia mirabilis. Nach E. T. Newton.

und Maxillare, die Dornfortsätze sind hoch und 3 Kreuzbeinwirbel vorhanden.

Gattungen Dimetrodon (Fig. 10 oben, und Schädelunterseite in Fig. 12): Die Augen erscheinen wegen der mächtigen Schnauze als stark nach hinten gedrängt. Ein Schläfenloch liegt jederseits über dem unteren Jochbogen. Manche Arten haben aber darüber noch einen oberen Schläfenbogen und oberes Schläfenloch. Im Zwischenkiefer stehen einige große Zähne, darauf folgt eine mächtige Kiefereinbuchtung (Diastema); und dahinter trägt das Oberkieferbein 1 bis 2 gewaltige Fangzähne, denen dann 20 kleinere und größere Zähne folgen, deren Ränder gesägt erscheinen. Die Dornfortsätze des Rumpfes sind gewaltig lang, der Schwanz aber ist kurz und nur mit niedrigen Dornfortsätzen versehen. Die Gliedmaßen tragen Krallen. Die Fundstätte war das Perm in Texas und Neumexiko. — Gattung Naosaurus (Art claviger; Fig. 10 unten). Der Schädel ist noch unbekannt; die riesig langen Dornfortsätze haben jederseits bis 6 seitliche Verästelungen (Fig. 11); die der Rückenmitte ragen senkrecht empor, die der Lendenwirbel dagegen sind stark nach rückwärts gebogen, so daß der letzte von ihnen die plötzlich stark verkürzten Dornen des Kreuzbeins und Schwanzes überragt. Das Tier hat ein Bauchknochenband. Die Fundorte liegen in Mittelamerika und im südlichen Nordamerika im obersten Karbon, sowie im Rotliegenden von Sachsen.

Zur Biologie des Naosaurus wäre noch zu bemerken (Trn.), daß dessen Stacheln, wie schon in dem Artikel „Reptilien" auseinandergesetzt wurde, unmöglich wie Bajonette zur Verteidigung des Tieres gekreuzt werden konnten, dagegen können sie, da sie höchstwahrscheinlich von braun- oder grünfarbiger Haut überzogen waren, und besonders dann, wenn sie nicht durch gemeinsamen Hautsaum verbunden waren, ein

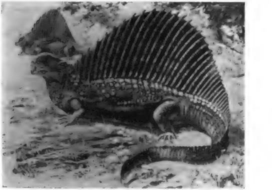


Fig. 10.



Fig. 11.

Fig. 10. Vorn Naosaurus; hinten Dimetrodon. Nach Charles Knight.

Fig. 11. Ein Rückenwirbel von Naosaurus von vorn. Ce Wirbelkörper und darüber der verästelte obere Dornfortsatz. Nach Lydekker.

ausgezeichnetes mimetisches Schutzmittel für das Tier gewesen sein, denn sie müssen inmitten von Gewächsen grünen oder vertrockneten Aesten täuschend geglichen haben, sind sie doch sogar zuerst als pflanzliche Ueberreste beschrieben worden. Und entsprechend dürften die sehr langen einfachen Dornfortsätze des Dimetrodon grünen oder vertrockneten Pflanzenhalmen vollendet ähnlich gewesen sein; und das in beiden Fällen selbst dann noch, wenn sie durch Haut miteinander verbunden waren. —

3. Unterordnung Theriodontia. Der Schädel (Fig. 5, 13 u. 14) ist ohne Knochenrunzeln- und Grubenbelag und hat gewöhnlich jederseits eine große obere Schläfengrube über dem Jochbogen. Die Zähne sind zu Schneide-, Eck- und Backzähnen fortgebildet. Die Gaumenzähne sind entweder nur schwach entwickelt oder fehlen. Jedes Achsel- und Hüftbein wird in 3 Knochen angelegt, und jedes Achselbein besteht demnach aus Schulterblatt mit starkem Processus clavicularis, Inter- und Postcoracoid. Es sind 2 bis 4 Kreuzbeinwirbel vorhanden. Der Hinterhauptshöcker ist häufig doppelt. Der Unterkiefer besitzt einen großen Processus coronoideus. Die Wirbel sind bikonkav. Die Tiere selbst stammen aus Perm und Trias (Karooformation). Sie werden in 2 Gruppen geteilt: 1. die primitiven (= Therocephalia Broom Fig. 15) aus den unteren Beaufortschichten Südafrikas, von denen aber fast nur Schädel bekannt sind. Die Pterygoidea stehen bei ihnen in der Mittellinie des Schädels eng aneinander. Das Gebiß ist noch verhältnismäßig wenig spezialisiert, doch sind 1 bis 3 Eckzähne vorhanden sowie einfach kegelförmige Backzähne. — Die mehr spezialisierten jüngeren Formen (die Cynodontia Fig. 5 und 16) haben nicht nur stärker spezialisierte Zähne, in Form von Schneidezähnen, einem extrem großen Eckzahn und Backzähnen mit Seitenspitzen, sondern die Zähne sind auch einwurzlig und sitzen in Zahnhöhlen der Kiefer.

Bei der Gattung Galesaurus sind die Außennaslöcher an der Schnauzenspitze gelegen und vereinigt. — Die Vertreter der Gatt. Cynognathus (Fig. 5, Schädel) sind Raubtiere von Tigergröße. Ihre Naslöcher sind getrennt. Der Schädel ist etwas zusammengedrückt. Außer dem großen oberen Schläfenloch haben manche Arten auch noch ein darunter liegendes kleines (Fig. 5, It). Das Hinterhaupt trägt 2 Gelenkhöcker. Die Unterkieferäste sind vorn miteinander verwachsen. Am Unterkiefer ist ein hoher Processus cornoideus vorhanden. Das Gebiß besteht jederseits aus 4 gezähnten oberen Schneidezähnen, einem mächtigen oberen Eckzahn mit seitlichen Kerben, und 9 seitlich zusammengedrückten, an Vorder- und Hinterrand gezähnten und teilweise auch noch dreispitzigen oberen Backzähnen; Unterkieferzähne dagegen fehlen. Zwischen Pubis und Ischium ist ein kleines Foramen pubo-ischiadicum vorhanden und zwischen beiden Knochen liegt ferner am Symphysenrand ein tiefer Einschnitt. Die Vertreter stammen aus der Trias Südafrikas. — Bei der Gattung Gomphognathus (Fig. 16) sind oben und unten jederseits 3 Schneide-, 1 Eck- und 12 Backzähne, und ein großer Zwischenraum (Diastema) trennt den Eckzahn von den Backzähnen; von letzteren sind ferner eine Anzahl ansehnlich quer verbreitert und mit relativ niedrigen Höckern auf den Kronen versehen, so daß das Tier deshalb für einen Pflanzenfresser gehalten wird. Die Trias Südafrikas lieferte die Funde. — Gattung Gomphognatus; Schädelunterseite Fig. 16.

4. Unterordnung Dicynodontia (Fig. 6, 7, 13 und 14). Der Kopf ist plump und von kräftigem Knochenbau, so daß häufig sämtliche Schädelnähte verschwinden; und die Schädeloberfläche zeigt keinen Knochenwulst- und Grubenbelag, ist aber mit einem Scheitelaugenloch versehn. Die Schläfengegend ist nicht voll überknöchert, sondern es sind ein mächtiges Schläfenloch und ein unterer Schläfenbogen vorhanden. Besonders charakteristisch für die Tiere aber ist einmal die außerordentliche Verlängerung ihres Unterkieferstiels, d. h. ihres Knochenapparats für den Ansatz des Unterkiefers an den Schädel, nämlich des Quadratum und Squamosum, die dann auch noch oft verwachsen sein können, und von denen das Squamosum dabei das Quadratum von außen her so überdeckt, daß dieses bei flüchtigem Hinsehen auffällig klein zu sein scheint. Dieser mächtige Unterkieferstiel ist dabei nicht nur nach unten, sondern auch nach vorn gerichtet. Charakteristisch ferner ist für die Tiere die außerordentlich geringe Bezahnung, denn es sind an der Schnauze entweder nur eine Anzahl kleiner Maxillarzähne vorhanden oder zumeist nur ein Paar großer hauerartiger Eckzähne, die aber auch fehlen können. Dann besitzen die Tiere ferner noch ein nur von den Maxillaren und Palatinen, aber nicht Prämaxillaren gebildetes unteres Munddach. Ihr Hinterhauptsgelenkhöcker ferner ist einfach, aber dreilappig. Die Unterkieferbeine sind zu einer hohen und schmalen Platte zusammengedrückt, in der Symphyse miteinander verwachsen, ohne Kronfortsatz und ohne Zähne. Die Ränder der Schnauzenspitze und des Unterkiefers aber sind scharfkantig und haben daher im Leben wahrscheinlich ähnlich dem Schildkrötenschnabel Hornscheiden getragen. Die nur von einigen Tieren bekannte Beckengegend zeigt 4 Kreuzbeinwirbel. Im Becken selbst zwischen Ischium und Pubis liegt ein mit einem Foramen pubo-ischiadicum vereinigtes Foramen pubicum; und in der Symphyse des Beckens springt zwischen die beiden Knochen ein Einschnitt ein. Im Achselbezirk sind das Schulterblatt, Inter- und Postcoracoid durch Furchen voneinander abgegrenzt und im Intercoracoid liegt ein

Foramen coracoideum. Die Tiere waren als Altweltbewohner sehr verbreitet und stammen aus dem oberen Perm Südafrikas (Beaufortschichten), ferner aus dem Perm Vorderindiens und aus der Grenzschicht von mittlerer und oberer Trias von Schottland und Rußland.

Die Gattung: Dicynodon (Fig. 7, 13 und 14), mit vielen Arten aus der Karooformation Südafrikas, erreicht in einzelnen Arten beträchtliche Größe. Der massige, gekrümmtschnauzige Schädel erinnert in Größe und Profillinie an eine große Transversum anderer Reptilien. Das Becken ist kräftig, dreiknochig, an 4 bis 5 Kreuzbeinwirbeln befestigt; seine Oberschenkelpfanne liegt gegenüber dem Kreuzbein; Pubis und Ischium sind miteinander vereinigt und es ist kein Foramen pubo-ischiadicum zwischen ihnen vorhanden, wohl aber das Foramen pubicum. Die Gliedmaßen sind fünfzehig und sehr stark; Oberarm- und Oberschenkelbein haben enorme Gräten.

Gattung Oudenodon: Die Tiere gleichen sehr den vorigen, haben aber gar keine Zähne, und sind deshalb vielleicht die Weibchen der vorigen.

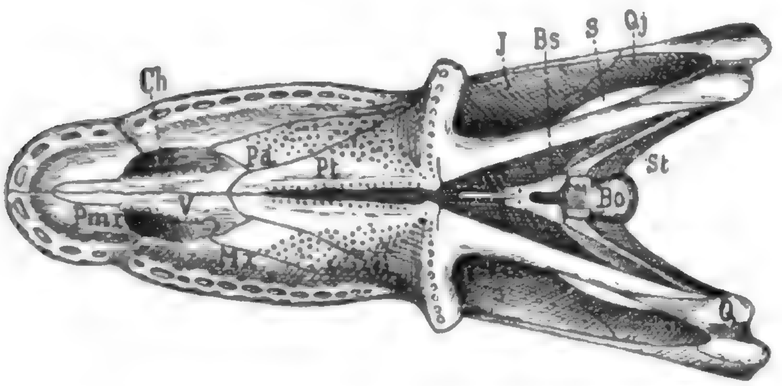


Fig. 12. Dimetrodon gigas. Schädel v. unten. Rekonstr. nach Case. Pmx Prämaxillare, Mx Maxillare, V Vomer, Pl Palatinum, Pt Pterygoid, Bs Basisphenoid, Bo Suboccipitale, St Columella, Q Quadratum, Qj Quadratojugale. J Jugale, Ch Binnennaslöcher. Die kleine obere Schläfenöffnung (S) kann bei anderen Arten geschlossen sein.

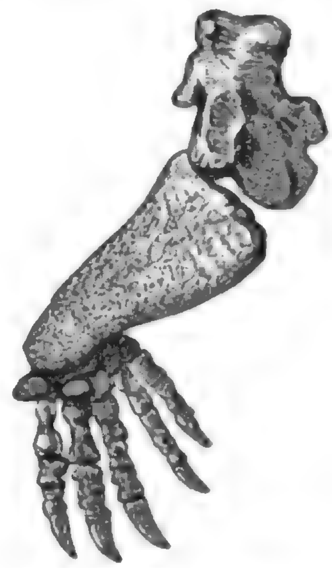


Fig. 13. Vordergliedmaße von Dicynodon. Nach Owen.

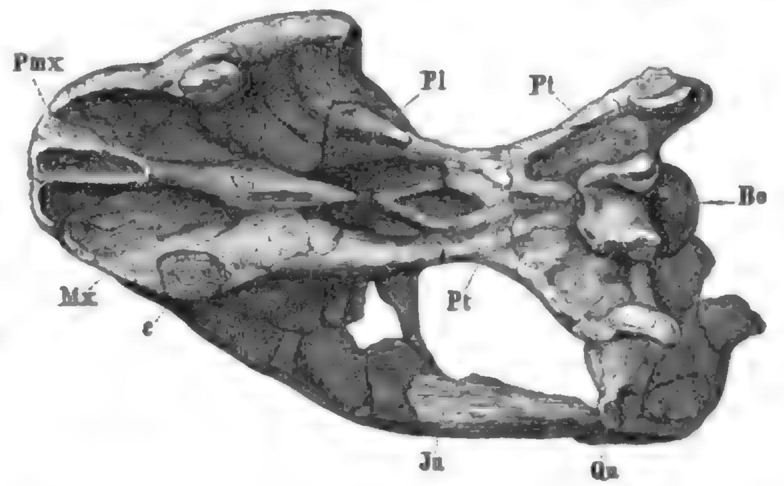


Fig. 14. Dicynodon pardiceps. Schädel von unten. Pmx Prämaxillare, Mx Maxillare, Pl Palatin, Vo Vomer. Pt Pterygoid, Bo Suboccipitale, Qu Quadratum, c der einzige große Zahn. Nach R. Owen. Aus Zittel-Broili.

Katze, daher die Artnamen: leoniceps und tigriceps. Der Jochbogen ist fast säugetierartig, aber die hintere Grenze der Augenhöhle wird durch einen selbständigen Postfrontalknochen gebildet. Die Naslöcher liegen seitlich am Schädel. Die Eckzähne sind auffällig groß. Die Binnennaslöcher öffnen sich hinter dem rhombischen Vomer, zwischen den getrennten Palatinen, die ihrerseits mit den zu einer Platte verwachsenen Pterygoiden verwachsen. Jedes Pterygoid sendet dabei einen platten Auswuchs entlang der Außenseite des zugehörigen Palatinums nach vorn, diese Knochenspange erreicht das Maxillare und ist wahrscheinlich gleichwertig dem selbständigen — Gattung Gordonia (Fig. 6): Aus dem neuen roten Sandstein von Elgin in Schottland. Sie ist den vorigen beiden sehr ähnlich, aber die Eckzähne sind stark rückgebildet. Besonders bemerkenswert ist, daß hier auch der Jochbogen in Verbindung mit Quadrat und Squamosum sehr stark verlängert ist, und daß das Tier einen schmalen Scheitelbeinkamm und ein selbständiges Interparietalbein besitzt, welches das Scheitelaugenloch trägt. Die inneren Naslöcher sind vereinigt und liegen in den Palatinen, die nicht zusammengewachsen sind. Die Pterygoidea, Quadrata und der Jochbogen schließen ferner eine mächtige Gaumenlücke ein.

Zur Biologie und Phylogenie der Anomodontier wäre zu bemerken; sie werden von mehreren Forschern: so besonders von Seeley und Broom für unmittelbare Vorfahren der Säugetiere angesehn, während Gadow und Broili zwar zugeben, daß sie in gewissen Charakteren mit Säugetieren übereinstimmen, daneben aber entweder doch noch die Hauptcharaktere der Reptilien aufweisen, oder aber trotz dieser Säugetiercharaktere so „hoffnungslos spezialisiert sind", daß sie als Säugetiervorfahren deshalb nicht in Betracht kommen können. Was richtig sein dürfte; und wozu noch zu bemerken wäre (Trn.), daß sie in allen phylogenetisch wirklich maßgebenden Gliedmaßenbezirkscharakteren entschieden noch fast ganz reine Amphibienstufe aufweisen, auf dieser aber zugleich als extremste Grabspezialisten stehn; daß ferner genau so extrem differenzierte Gebisse wie die ihrigen nicht nur bei Säugetieren, sondern — nach Dr. Pappenheims mündlicher Mitteilung — bereits bei Knochenfischen vorkommen, während bei anderen Säugetieren (Zahnwalen z. B.) keine differenzierten Gebisse zu finden sind usw. —

2. Ordnung Ophidia, Schlangen. Hauptcharaktere (vgl. den Artikel „Reptilien"): Die Schädelkapsel ist völlig verknöchert. Parietale und Prämaxillare sind unpaar. Das Scheitelaugenloch im Parietale fehlt. Temporalbögen und Cranii columellae (Eptopterygoid) fehlen. Das Quadratbein ebenso Pterygoidea, Maxillaria, Palatina und Transversa sind beweglich und lose mit dem Schädel verbunden. Die Unterkieferäste werden in der Symphyse durch Bänder verbunden. Die Wirbel sind konkav-konvex und haben Zygosphen- und Zygantrumverbindung. Wichtigere Charaktere sind auch noch: Der Körper ist stark verlängert und aus sehr vielen Wirbeln (zuweilen mehr als 400) bestehend; es fehlen Brustgürtel und Vordergliedmaßen ganz und Hintergliedmaßenreste sind nur noch bei einigen vorhanden (Pythoniden, Glauconiiden). Die Rippen sind einköpfig. Die Zähne sind auf den Kieferrändern angewachsen kegelförmig zugespitzt, und nach hinten gekrümmt. Außer den Kieferzähnen sind solche auf Palatinen und Pterygoiden häufig vorhanden. Die Schlangen sind auf den Bauchschienen vermittels Horizontalbiegungen des Leibes kriechende Reptilien, die ihre großen Beutetiere unzerkleinert verschlucken. — Paläontologisch sind sie aus dem Eozän bis zur Gegenwart sicher bekannt. Aber die paläontologischen Funde waren bis zur Gegenwart nur gering, betreffen zumeist nur sehr unvollkommene Reste und vorwiegend einzelne Wirbel. Vollständig erhalten dagegen sind solche aus dem europäischen Tertiär. Vipern konnten aus dem Untermiozän von Mainz festgestellt werden; Wirbel großer Riesenschlangen aus dem älteren Tertiär Europas und im Eozän Nordamerikas und Aegyptens. Zu keiner der zurzeit lebenden Gattungen gehören dagegen eine Anzahl von stark seitlich zusammengedrückten Schlangen aus dem oberen Eozän Venetiens mit fünfkantigen Zähnen und sehr vielen Wirbeln, nämlich über 550. Man hält sie für Seeschlangen der eozänen Meere: Gattung Archaeophis.

3. Ordnung Lacertosauria, Eidechsen (= Sauria, Lacertilia, Sauria vera, Autosauria). Hauptcharaktere der Saurier (vgl. den Artikel „Reptilia") sind: Es ist bei ihnen jederseits nur ein Schläfenbogen, und zwar der obere, vorhanden und begrenzt derselbe eine obere und untere Schläfenlücke. Die Unterkieferhälften sind am Kinn fest durch Naht miteinander verbunden. Die Bauchrippen fehlen. Das Quadratum ist (ausgenommen bei den Chamaeloniden) etwas beweglich mit der Schädelkapsel verbunden und liegt zwischen dem Außenflügel des zugehörigen Latroccipitalen, Squamosum und Supratemporale. — Wichtigere Charaktere sind ferner: Zumeist ist ein Scheitelaugenloch im Schädel vorhanden. In den Seitenpartien des Schädels sind größere Abschnitte nicht verknöchert. Das Os transversum und die Craniicolumella (Epipterygoid) fehlt nur den drei Familien: Amphisbaeniden, Chamaeleoniden und Anielliden. Die Zähne sind zuweilen mehrspitzig und gewöhnlich acrodont oder pleurodont. Die Wirbel sind entweder bikonkav (Geckonen, Uroplatiden) oder konkav-konvex. Das Kreuzbein wird, wenn es vorhanden ist, von zwei Wirbeln gebildet. Die Rippen sind einköpfig. Zygosphen-Zygantrumverbindung kommt bei den Iguaniden vor. Schlüsselbeine und Episternum sind häufig vorhanden; fehlen aber den Chamaeleoniden. Im Oberarm des Waran ist ein inneres Condyloidloch vorhanden. Die Finger- und Zehenzahl ist zumeist 2, 3, 4, 5, 3; bei den Chamaeleoniden aber 2, 3, 3, 3, 3.

Die paläontologischen Formen treten in Europa vom obersten Jura an bis zur Gegenwart auf; in Nordamerika erst von der obersten Kreide an. — In die zurzeit lebenden Gruppen lassen sich einfügen: Agamiden aus obereozänen bis miozänen Schichten Frankreichs; Iguaniden aus dem Untereozän Nordamerikas, aus Obereozän- bis Miozänschichten Frankreichs; Anguiden (Gattung Euposaurus) aus dem obersten Jura Frankreichs und aus dem unteren Eozän Nordamerikas; Helodermatiden aus dem Untereozän in Nordamerika und Obereozän bis Miozän Frankreichs; Chamaeleoniden im Untereozän Nordamerikas; Varaniden (Palaeovaranus) aus dem Pleistozän von Queens-

land, und die Art Varanus (Megalania) priscus soll 10 m Länge erreicht haben. — Weniger wichtig ist hierbei, daß die Iguaniden, von denen in der Gegenwart zwar die meisten in der neuen Welt, 2 Gattungen (Chalarodon und Hoplurus) aber auch schon in Madagaskar vorkommen, dereinst auch noch in Europa vertreten waren, als daß so spezialisierte und lokalisierte Formen wie Helodermatiden, die zurzeit nur in Nordamerika leben, und vor allem Chamaeleontiden, die zurzeit auf Afrika und Südwestasien beschränkt sind, paläontologisch auch noch in anderen Kontinenten gefunden worden sind (Trn.).

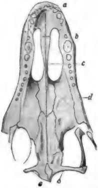


Fig. 15. Scylocosaurus Sclateri (Therocephale). Unvollständiger Schädel von unten. a Prämaxillare mit Resten von 6 Zähnen, b Maxillare mit starkem zweiten Zahn, c Vomer, daneben das Binnennasloch, d Palatinum, e Pterygoideum mit winziger Zahnreihe. Nach Broom.

Nur rein paläontologische Lacertosaurier sind ferner:

Familie 1 Dolichosauridae, mit kleinem, waranartigem Schädel, in welchem die Prämaxillen, sowie die Frontalia und Parietalia durch Zusammenwachsen unpaar geworden sind, mit wirbelreichem Hals, schlangenartig gestrecktem Körper und sehr wirbelreichem kräftigem Ruderschwanz. Ihre Gliedmaßen ferner sind stark verkümmert und zu Ruderorganen umgestaltet. Die Wirbel sind konkav-konvex und haben Zygosphen-Zygantrumverbindung. Es sind kleine, aber auch bis 1½ m lange Tiere, dem Leben im Meere angepaßt. Gefunden sind sie in der unteren bis oberen Kreide Dalmatiens (Gatt. Adriosaurus, Pontosaurus), ferner in der oberen englischen Kreide: Gatt. Dolichosaurus (Art: longicollis) mit 17 Halswirbeln.

Familie 2 Aegialosauridae. Es sind Echsen mit langschnauzigem Schädel, der auch Pterygoidzähne besitzt, mit kurzem Hals und langem Schwanz. Die Gliedmaßen sind für den Landaufenthalt geeignet, aber vorwiegend für das Leben im Wasser eingerichtet. Die Tiere stehen zwischen Varaniden und der hier nächstfolgenden Fam. Mosasauridae. Sie stammen aus der unteren Kreide Dalmatiens.

Familie 3 Mosasauridae (Fig. 17 bis 20 und 32), Meerschleichen. Hauptcharaktere: Es sind schlangenförmige Meerechsen, mit Flossenfüßen, aber vorwiegend Schwanzruderer, und haben weit aufklappbaren Mund. Der Schädel ferner zeigt Schnauze und Unterkiefer

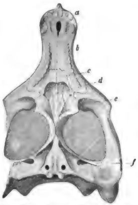


Fig. 16. Gomphognathus (Cynodontier). Schädel von unten. a Prämaxillare mit 3 Zähnen, b Maxillare mit großem Eckzahn und geschlossener Reihe stumpfer Backzähne, c Palatinum, d Vomer die Binnnaslöcher trennend, e Pterygoid, f Quadratum. Aus Stromer v. Reichenbach. Nach Broom.

mächtig verlängert und hat ein schmales Dach, denn in ihm sind vom Zwischenkiefer an bis zu den Scheitelbeinen alle Schädelknochen einfach und bei den meisten Tieren sind sogar noch Zwischenkiefer und Nasenbein miteinander verwachsen. Trotzdem aber trägt das einfache Parietale ein Scheitelaugenloch. Ein Skleralring ferner umfaßt das große Auge. Das Quadratbein liegt vor dem Ohr und bildet mittels einer Aushöhlung oder Fensterung eine Art Ohrmuschel. Die beiden Unterkieferhälften sind durch Bandmaße verbunden und daher aneinander beweglich wie bei den Schlangen. Dazu kommt, daß in jeder Unterkieferhälfte in der Mitte noch ein besonderes Gelenk ausgebildet ist (zwischen Dentale und Supraangulare einerseits und Angulare und Spheniale = Operculare andererseits, so daß der Mund also weit ausdehnbar ist. Die Kieferzähne sind große Kegel in einer Reihe, aber auch die Pterygoide tragen Zähne, und alle diese sind in Zahngruben angewachsen. Die Wirbel sind konkav-konvex und haben Zygosphen-Zygantrumverbindung. Der Rumpf der Tiere aber ist langgestreckt, des-

gleichen der Schwanz, dem oben und unten starke Dornfortsätze ansitzen, wobei an der Schwanzunterseite jede Hämapophyse mit dem zugehörigen Wirbelkörper gelenkt. Es sind insgesamt über 100 Wirbel vorhanden (Fig. 20), davon 7 Halswirbel. Kreuzbeinwirbel dagegen fehlen, und das Becken liegt frei in der Rumpfwand. Die Gliedmaßen (Fig. 18 bis 20) sind zu kleinen krallenlosen Flossen, also zu reinen Ruderorganen, vereinfacht, es sind keine Schlüsselbeine vorhanden, dagegen zuweilen ein Episternum.

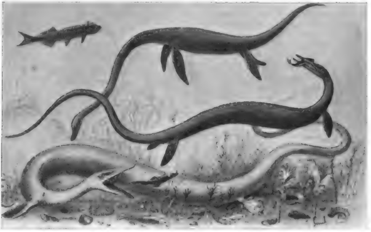


Fig. 17. Schlangenhalsechse und Meerschleichen. Oben Elasmosaurus (Sauropterygier), in der Mitte Clidastes, unten Mosasaurus. Die beiden letzteren sind Mosasaurier. Nach Hutchinson.

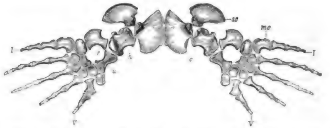
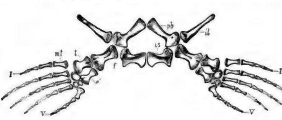


Fig. 18. Brustgürtel und Vordergliedmaßen von Clidastes velox. c Coracoideum, sc Schulterblatt, h Humerus, r Radius, u Ulna, mc Metacarpus, I erster, V fünfter Finger. Nach Marsh. Aus Zittel-Broili.

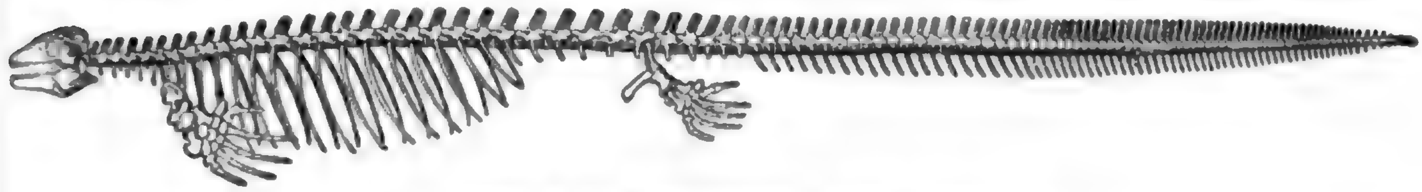
Fig. 19. Platecarpus simus. Beckengürtel und Hintergliedmaßen. il Ileum, pb Pubis, is Ischium, f Femur, t Tibia, f' Fibula, mt Metatarsus, I erster, V fünfter Zeh. Nach Marsh. Aus Zittel-Broili.

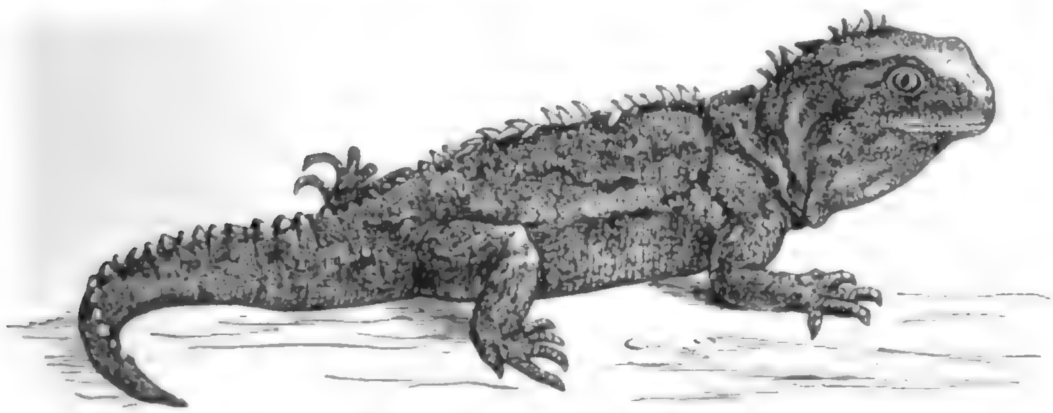


Die Mosasauriden selbst wurden bisher nur aus der oberen Kreide bekannt, dafür aber in weiter Verbreitung durch Europa, Nord- und Südamerika und Neuseeland nachgewiesen, und liefern etwa ein Dutzend Gattungen, von denen bisher am besten bekannt sind: Gattung Mosasaurus (Fig. 17 unten): Riesige Tiere, deren Kopf über 1 m, der Körper über 12 m lang werden kann; mit mächtigen scharfkantigen Zähnen. Zwischenkiefer- und Nasenbein sind bei ihnen nicht verwachsen. Sie haben ferner hinten nur 4 Zehen. Art Mosasaurus camperi, mit vielen Zähnen, die den Kieferrändern angewachsen und gekrümmt sind. Die Arten stammen aus den oberen Kreideschichten der Niederlande, Englands und Nordamerikas. — Gattung Platecarpus. Die Tiere sind etwa 5 m lang, haben verhältnismäßig kurze Schnauze und fünfzehige Hinterfüße. Sie sind häufig in der oberen Kreide von Nordamerika, Texas und Frankreich. — Gattung Clidastes (Fig. 17 Mitte): Deren Artschaft hat langgestreckte und stark zugespitzte Schnauze, dazu Hinterfüße mit 4 Zehen, und am Hinterende des Schwanzes stark verlängerte Dornfortsätze. Sie stammen aus der Kreide Nordamerikas. — Gattung Tylosaurus, Schädelunterseite Figur 32.

4. Ordnung Rhynchocephalia, Krummschnauzechsen. Hauptcharaktere (Fig. 21 bis 23; vgl. den Artikel „Reptilien"): Am Schädel sind ein oberer und ein unterer Schläfenbogen ausgebildet. Das Quadratum *ist unbeweglich* durch die benachbarten *Knochen am* Schädel festgelegt, vor allem durch Ueberlagerung von außen durch das Squamosum und durch Ausläufer des Pterygoids. Die Unterkieferäste sind an der Berührungsstelle durch Bandmassen verbunden. Alle Rhynchocephalen ferner besitzen nur 2 Kreuzbeinwirbel. Ihre Rippen sind zumeist einköpfig, und ferner ist ein Bauchknochenband vorhanden. Die Gliedmaßen besitzen je 5 Zehen, mit der Zehenformel 2, 3, 4, 5, 3 (4). Der einzige zurzeit noch lebende Vertreter (Fig. 21) hat kein männliches Begattungsorgan.

Sonstige Charaktere sind: Der Körper ist meist eidechsenartig. Die Wirbel sind gewöhnlich bikonkav (amphicöl) und zuweilen von Chordaresten der ganzen Länge nach durchbohrt. Zwischen den Wirbeln liegen häufig Intercentra. Der Schädel hat große seitlich liegende Augen und gewöhnlich ein Scheitelaugenloch. Jede Bauchbandspange besteht aus mehreren Stücken. Es ist gewöhnlich ein unteres sekundäres Munddach vorhanden, das dann durch die Vomera, Palatina und Pterygoidea, aber nicht Maxillaria gebildet wird, und in welchem die Vomera und Pterygoidea aneinander stoßen. Zähne können nicht nur auf den Kiefern, sondern auch am Gaumendach, an den Vomerbeinen, sowie an den Palatin- und Pterygoidknochen auftreten und auf den Knochenrändern (acrodont) oder in seichten Gruben der Knochen (protothecodont) anwachsen; aber auch ganz zahnlose Formen kommen vor (Sauranodon). Das Achselbein ist nach dem Brückensystem massiert verknöchert, und das deshalb durchaus einheitlich auftretende Coracoid wird von einem mächtigen Epicoracoid umrandet (Trn). Schlüsselbeine und Episternum (= Interclavicula) sind vorhanden. Das Brustbein ist noch rein knorplig. — In der Beckengleite für den Oberschenkel


Fig. 20. Skelett von Platecarpus. Nach Merriam.


Fig. 21. Hatteria punctata. Nach Gadow.

stoßen die bis dahinein unverwachsenen 3 Beckenbeinknochen Ileum, Ischium und Pubis in Naht aneinander. — Der Name Rhynchocephalia stammt daher, weil bei den Hauptvertretern der Ordnung die Schnauzenspitze hakenartig nach unten überhängt (Fig. 23).

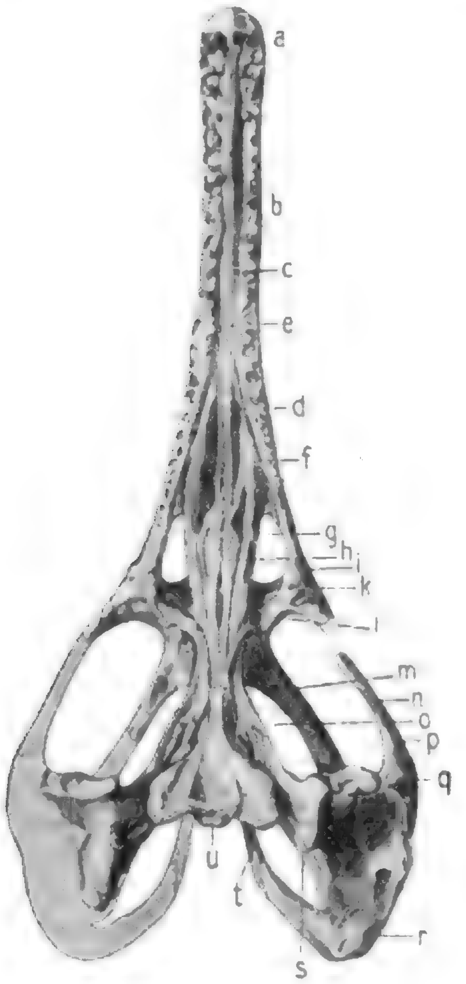


Fig. 22. Champsosaurus lamariensis (Rhynchocephalia, Champsosauridae). Schädel von unten. Rechts Schläfenbogen ergänzt. a Bezahntes Praemaxillare (darüber Nasenöffnung), b bezahntes sehr langes Maxillare, c ?Ethmoideum, d Binnennasloch zwischen e bezahntem Vomer und f bezahntem Palatinum, g Augenhöhle und Gaumenlücke darunter, h bezahntes Pterygoideum, i Jugale, k Transversum, l Postorbitale, m Postfrontale, n unteres, o oberes Schläfenloch, p Quadratojugale, q Quadratum, r Squamosum, s Latroccipitale, t Hinterast des Parietale, u Basisphenoideum und Suboccipitale mit dem Hinterhauptshöcker.

Die Rhynchocephalen traten gleichzeitig mit den Anomodontiern im Perm auf und reichen bis zur Gegenwart, in der sie durch die Gattung Hatteria (= Sphenodon), die in Neuseeland lebt, vertreten werden. Diese lebende Form hat Hornschuppen auf der Haut, die bei einigen ausgestorbenen Vertretern gleichfalls nachgewiesen sind.

Die Ordnung, eine „Sammelgruppe", wie Steinmann treffend bemerkt, wird in 5 Familien gegliedert.

Familie 1 Proterosauridae (= Protorosauridae). Die Schnauze ist kurz, die Außennaslöcher sind klein, endständig und voneinander getrennt. Das Scheitelauge fehlt. Das Coracoid ist einheitlich verknöchert, Schlüsselbeine und Episternum sind vorhanden. Die Wirbel sind bikonkav. Außer den Kieferknochen hat noch das Gaumenbein spitzkeglige Zähne, die in Gruben oder auf den Kieferrändern aufgewachsen sind. Auf den Vomerbeinen stehen Bürstenzähne (= Chagrinzähne, Broili). Die Rippen sind durchweg einköpfig. Der Oberarm besitzt ein inneres Condyloidloch. — Aus dem Perm Europas stammen die Vertreter.

Dazu gehören als Gattung Paläohatteria. Ein Ring von Skleralknochen umgibt das Auge. Die Wirbel sitzen wie Hülsen auf der sie durchbohrenden Chorda; in ihnen selbst stoßen Körper und oberer Bogen nur erst unter Natbildung aneinander. Intercentra sind bis gegen das Schwanzende hin vorhanden. Die Bauchbandspangen sind einfache Stäbchen. Das Episternum läuft nach vorn in eine rhombische Platte aus. Das Coracoid war offenbar noch eine Knorpelplatte mit Knochenkern und zwischen Pubis und Ischium lag noch ein Knorpelstreif, der mit dem Pubis zusammen das Foramen pubicum (= obturatorium) halbseitig umschloß; während ein Foramen pubo-ischiadicum den Tieren fehlt. Unteres Perm, und zwar das mittlere Rotliegende von Niederhäßlich bei Dresden enthielt die Funde. — Gattung Proterosaurus. Körper $1\frac{1}{2}$ m lang. Die Wirbelkörper sind völlig verknöchert und mit ihrem oberen Bogen verwachsen. Die Kieferzähne waren in Gruben angewachsen, der Vomer besaß Bürstenzähne. Der Schädelbau ist nicht genügend bekannt. Aus dem oberen Perm in Deutschland und England stammen die Arten.

Familie 2 Sphenodontidae. Die Wirbel sind bikonkav sowie mit Chordaresten versehn, und Intercentra liegen dazwischen. Die Schnauzenspitze hängt mit dem Zwischenkieferbezirk etwas über den Unterkiefer herab und ist mit 2 kräftigen Schneidezähnen bewehrt. Außer den Kieferbeinen haben auch die Gaumenbeine je eine Längsreihe seitlich zusammengedrückter, dreieckiger, den Kieferrändern aufgewachsener Zähne. Ein Scheitelaugenloch ist vorhanden. Ein kräftiges Bauchknochenband desgleichen. Die Halsrippen sind zwei-, die Rumpfrippen einköpfig. — Bekannt wurden Vertreter aus dem obersten Jura, sowie eine zurzeit noch lebende Art.

Gattung Homeosaurus (Art pulchellus): Aehnelt sehr der jetzt noch lebenden Hatteria, ist aber kleiner. Die Unterkieferäste ferner sind verwachsen. Intercentra kommen nur in der Halsregion vor. Die Rippen besitzen keine Processus uncinati. Die Augen haben einen Skleralring. Der oberste Jura (Tithon) von Mitteleuropa lieferte die Funde. — Gattung Hat-

teria (= Sphenodon). Die vorn liegenden Außennaslöcher werden durch die Intermaxillaria voneinander getrennt. Die Vomera sind bezahnt. Vomera, Palatina und Pterygoidea (dagegen nicht die Maxillaria) bilden ein unteres (= sekundäres) Munddach (Fig. 21 und im Artikel „Reptilia“ Fig. 3) und zwar derartig, daß die Vomera mit den Pterygoiden darin aneinanderstoßen und deshalb die Palatina sich nicht berühren. Die Binnennaslöcher münden seitlich von den Vomerbeinen in den Mund. Die Quadrate werden durch die Squamosa, Latroccipitalia und durch den unteren Schläfenbogen unbeweglich festgestellt. Intercentra sind in Hals und Rumpf vorhanden. Es ist dies die einzige Art der Ordnung sowie auch unter sämtlichen Reptilien, deren Oberarm ein inneres und auch äußeres Conchyloidloch besitzt. Sie hat ferner einen Schuppenkamm auf Hinterkopf, Rücken und Schwanz, also nicht auf dem Nacken. Diese Schuppen sind vergrößerte Cutispapillen, die eine dünne Hornscheide tragen. Auf der Bauchunterseite liegen Hornschilder in Querreihen; Rücken und Seiten dagegen sind feinkörnig und weichhäutig. Der Schwanz ist dick und schwach zusammengedrückt. Die Pupille steht senkrecht. Die Art selbst ist zurzeit nur noch auf einzelnen kleinen Inseln in der Plentybay der Nordinsel von Neuseeland vorhanden. — Die Gatt. Pleurosaurus hatte schlangenartigen Körper und wird bis $1\frac{1}{2}$ m lang, wovon $\frac{2}{3}$ auf den ungeheuer langen Schwanz entfallen. Die Gliedmaßen sind klein. Oberster Jura von Bayern und Cerin (Ain) lieferten die Funde.

Bei der Familie 3 Rhynchosauridae sind die Wirbel bikonkav und Intercentren nicht vorhanden. Die Schnauzenspitze, soweit sie von den Prämaxillaren gebildet wird (Fig. 23), ist hakenartig abwärts gekrümmt und zahnlos. Auf Maxillaren und Palatinen sind kleine, kegelförmige Zähne. Der Außeneingang der Nase ist einfach. Das Becken hat ein großes Foramen puboischiadicum. Die Bauchbandspangen sind kräftig entwickelt, liegen eng aneinander und sind jede aus 3 Stücken zusammengesetzt. Auch viereckige Bauchschuppen sind nachgewiesen. Aus der Trias Europas und Südafrikas stammen die Gattungen:

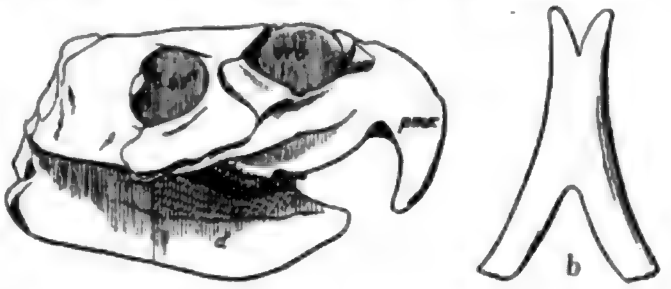
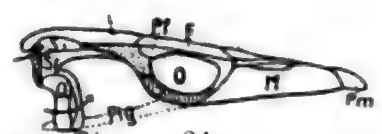
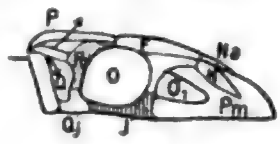


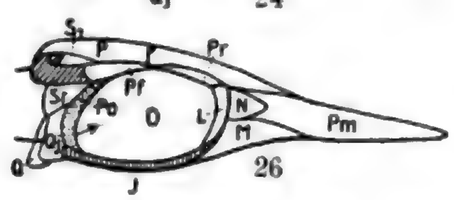
Fig. 23. Schädel und Unterkiefer von Hyperodapedon. pmx Prämaxillare, orb, Augenhöhle, ltf oberes Schläfenloch, d Unterkiefer; b Unterkiefer von unten gesehn. Nach Woodward.



24



25



26

Fig. 24 bis 26. Schädelumrisse, um den Bau der Schläfenbogen und -löcher zu zeigen, 24 von Clidastes (Mosasauride), 25 von Dimorphodon (Pterosaurier) und 26 von Ichthyosaurus. F Frontale, I Scheitelaugenloch, J Jugale, mit senkrechter Schattierung, lt unteres Schläfenloch, L Lacrymale, M Maxillare, N Außennasloch, Na Nasenbein, O Augenhöhle, O_1 Schnauzenseitenloch (Präorbitalloch), P Parietale, Pf Postfrontale, Pm Zwischenkiefer, Po Postorbitale (punktiert), Pr Präfrontale, Ptg Pterygoid, Q Quadratum, Qj Quadratojugale, Sq Squamosum, schräg schattiert, St Supratemporale, S_1 oberes Schläfenloch. Nach Gadow.

Gattung Rhynchosaurus. Die niedergekrümmte zahnlose Schnauzenspitze liegt bei Mundschluß über einem nach oben gekrümmten kurzen Fortsatz des Unterkiefers. Die Außennaslöcher sind vereinigt. Die Fundstätte ist England. — Die Gattung Hyperodapedon (Fig. 23) ist ähnlich der vorigen, aber die Hakenschnauze paßt bei Mundschluß in eine Gabelung des Unterkiefers, die vor der kräftigen Unterkiefernaht liegt, und die Zähne stehen auf Gaumen- und Oberkieferbeinen in 2 und mehr Reihen. Die Wirbel ferner sind solid, die des Halses konvex-konkav (opisthocoel). Das Skelett ist bis 2 m lang. Aus den unteren Schichten der oberen Trias von Schottland (Elgin) und Zentralindien stammen die Arten.

Familie 4 Campsosauridae (Fig. 22 Munddach). Die Wirbel sind bikonkav und die Intercentra nur in der Halsregion entwickelt. Die Schnauze ist ungemein verlängert, gavialartig, die Außennaslöcher sind vereinigt und endständig; die Kieferzähne in Gruben angewachsen und kegelförmig und haben außen längsgefaltetes Dentin; daneben tragen die meisten Munddachknochen auch noch Zähne. Es ist kein Foramen pubo-ischiadicum vorhanden, wohl aber ein Foramen pubicum (obturatorium). Das älteste Tertiär Westeuropas sowie die Kreide Nordamerikas lieferten die Belege.

Die Tiere selbst waren dem Leben in Süßwasser vorzüglich angepaßt.

Gattung Campsosaurus. Bis $1\frac{1}{2}$ m lang, 40 Zähne auf jeder Unterkieferhälfte.

Familie 4 Sauranodontidae. Die Wirbel sind konkav-konvex (procöl). Der Ober- und Unterkiefer sind schnabelartig gegeneinander gekrümmt und haben scharfe Ränder. Die Zähne fehlen ganz. Die Außennaslöcher sind getrennt und die Bauchbandspangen kräftig entwickelt. Die Schuppen waren viereckig.

Aus dem obersten Jura Europas stammt die allein bisher bekannte Gatt. Sauranodon.

Familie 5 Thalattosauridae. Die Wirbel sind bikonkav. Die Schnauze ist verlängert, und zwar durch bedeutende Zunahme der Zwischenkiefer und Maxillaren. Die Außennaslöcher liegen voneinander getrennt dicht vor den großen Augenhöhlen. Die Augen tragen einen Knochenring in der Sklera. Die vorderen Kieferzähne sind etwas nach hinten gekrümmt und kegelförmig, die hinteren Kieferzähne abgeplattet. Vomer und Pterygoide waren dicht bezahnt. Die Gliedmaßen gestreckt und flossenartig. Aus der oberen Trias Kaliforniens stammen 2 hierhergehörige Gattungen. Es sind schwimmende Meeresbewohner.

5. Ordnung Ichthyosauria, Delphinechsen. Hauptcharaktere (Fig. 26 bis 28): Es sind Schwimmspezialisten des Meeres von delphinartiger Gestalt, mit nackter Haut, langschnauzigem Schädel, der auf mächtig verkürztem Hals fest dem Kopf angefügt ist, mit zu Ruderschaufeln fest durch Hüllhaut vereinigten, und zumeist verlängerten und vermehrten Vorder- und Hinterfußzehen; mit einem Ruderschwanz, welcher durch eine Hautflosse auf der Oberseite seines daselbst nach unten abgebogenen Schlußendes mit einer mächtigen Endgabel versehen ist, und mit einer Fettflosse auf dem Rücken.

Sonstige Charaktere sind: Es sind Tiere von 1 bis 10 m Länge, mit großem Schädel, der durch die schnabelartige Verlängerung der Prämaxillaren und Nasalen sehr langschnauzig geworden ist. Die in gleicher Weise verlängerten Unterkieferhälften stoßen in einer langen Naht aneinander und sind ohne eigentlichen Kronfortsatz. Die Maxillaren sind dafür auffällig klein. Die Außennaslöcher bleiben voneinander getrennt und liegen weit ab von der Schnauzenspitze und dicht vor den Augen. Die Innennaslöcher stehen ebenfalls dicht an den Augen und sind umgeben vom Vomer, Palatinum, Maxillare und Prämaxillare. Die Augen sind groß, stehen seitwärts und sind mit Skleralring versehen. Auch ist ein Scheitelaugenloch vorhanden; desgleichen die Craniicolumellae und wahrscheinlich auch die Transversa. Der Schädel hat ferner (Fig. 26) nur das obere Schläfenloch, daneben aber auch ein Fenster zwischen Quadratum und Quadratojugale. Der Hinterhauptshöcker ist einfach und wird vom Supoccipitale gebildet. Die Zähne sind zumeist zahlreich und spitze Kegel, sie haben einen dicken Dentinunterbau, der an der Wurzel nach außen hin Längsfalten bildet. Die Zahnspitze ferner ist von einer Schmelzschicht überdeckt, die Zahnwurzel dagegen von knochenähnlicher Zementmasse. Die Zähne stehen gemeinsam in einer einheitlichen Längsrinne ihres Kieferknochens und sind nicht angewachsen. Munddachzähne sind nicht vorhanden. Die zahlreichen Wirbel, 150 bis 200 an der Zahl, von denen $^2/_3$ auf den Schwanz kommen, sind auffällig kurz und bis zur Schwanzspitze hin tief bikonkav sowie scheibenartig. Die oberen Wirbelbogen verwachsen nicht mit den zugehörigen Wirbelkörpern und tragen seitlich stark zusammengedrückte Dornfortsätze. An der Schwanzunterseite hängen auch untere Wirbelbogen, mit entweder vereinigten oder getrennten Hälften. Der Atlas und Epistropheus sind zumeist verwachsen. Die vorderen Rumpfwirbel tragen 2 übereinander liegende kurze Höcker, als Ansatzstelle der zugehörigen gegabelten Rippen, weiterhin am Rumpf dagegen werden die Rippen ge-

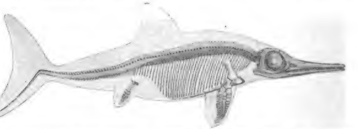


Fig. 27. Ichthyosaurus quadriscissus. Skelett und Körperumrisse. Nach Stromer v. Reichenbach und E. Fraas.

wöhnlich einköpfig. Bauchbandspangen sind stets vorhanden, zumeist zahlreich, grätenartig gebogen und jede aus einem Mittel- und zwei Seitenstücken bestehend. — Das Achselgebein (Fig. 28) besteht aus zwei getrennten

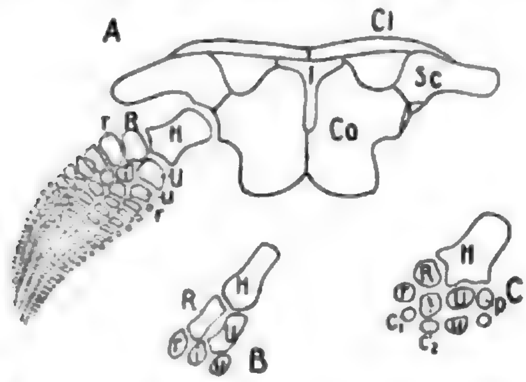


Fig. 28. Vordergliedmaßen von **Delphinechsen** von der Bauchseite. A vom Ichthyosaurus (aus der Lias und phylogenetisch alte Form), B von Mixosaurus (aus der Trias und phylogenetisch höher), C von **Ophthalmosaurus** (aus der Kreide und phylogenetisch höchste Form). c_1 und c_2 Centrale$_1$ und $_2$, Cl Schlüsselbein, Co Coracoid, H Oberarmbein, I Episternum, i Intermedium der Handwurzel, p Pisiforme, R Radius, r Radiale der Handwurzel, Sc Schulterblatt, U Ulna, u Ulnare der Handwurzel. Nach **Gadow**.

Stücken, aus dem kleinen und kurzen Schulterblatt und dem nach Brückenprinzip massiert verknöcherten Coracoid, und von einem selbständigen Intercoracoid ist deshalb nichts angedeutet. Die plattenförmigen Coracoide stoßen dabei in der Rumpfmittellinie aneinander. Außerdem kommen in der Regel auch ein T-förmiges Episternum sowie Schlüsselbeine vor. Das Brustbein aber war knorplig und ist deshalb stets verloren gegangen. Die Vordergliedmaßen sind stärker als die hinteren, und all ihre Knochen mit Ausnahme der Oberarmbeine ausgesprochen Platten von geringer Dicke; ferner liegen sie entweder abgerundet in Knorpel, der sie verband, oder stoßen kantig und ohne Gelenkbildung aneinander, d. h. sie lagen unbeweglich und eng aneinander gedrängt in der Hüllhaut. Die Zahl der Finger kann dabei auf 8 bis 10 vermehrt sein, und zwar entweder durch gablige Verdoppelung einzelner Finger oder aber durch Auftreten von Zusatzfingern am Innen- und Außenrande der Hand. Jeder Finger ferner hat mehr als 5 Glieder, bis über 20, so daß derartige besonders knochenreiche Vorderbeine mehr als 100 Knochen aufweisen können. Die Vorderfüße sind also zu, in sich unbeweglichen Ruderplatten umgewandelt, die noch dadurch besonders vergrößert werden, daß die Hüllhaut an der Fußspitze und an seinem Fußaußenrand als Hautfalte das Skelett weit überragt.

Die Beckengliedmaßen sind wesentlich kleiner und schwächer als die vorderen, aber ganz genau nach demselben Muster gebaut, d. h. als Ruder mit verlängerten und oft vermehrten Zehen und kurzem Schaft. Das Kreuzbein ferner fehlt und deshalb liegt das Becken frei in der Rumpfwand. Die drei Knochen jeder Beckenhälfte aber sind getrennt. — Da übrigens die gesamten 4 Gliedmaßen der phylogenetisch jüngeren, und hier auch noch paläontologisch älteren Vertreter dieser Gruppe viel mehr landwirbeltierartig gebaut sind als die der phylogenetisch älteren und hier auch paläontologisch jüngeren, ist das ein Beweis dafür, daß die Ichthyosaurier von Landwirbeltieren abstammen. — Der Körper war mit einer einfachen Lederhaut bedeckt, wie fossile Abdrücke beweisen, die Rückenflosse eine senkrecht gestellte, dreieckige Fettfalte der Haut, an deren Grund Verdickungen der Haut, wahrscheinlich Knochenkerne, lagen. Die Schwanzflosse stand ebenfalls senkrecht und wurde sicher auch in dieser Stellung als Schlagruder gebraucht. Die Gliedmaßen waren von lederartiger Hüllhaut umfaßt, und an ihrem Innenrand mit Hornschuppen bekleidet. — Die Kotballen — Koprolithen = Düngersteine — sind 18 cm lang, zeigen Spiraldrehung, die sie beim Durchwandern des Darmes erwarben, und enthalten Fisch- und Tintenfischreste als Beweise dafür, daß die Delphinechsen von Meeresbewohnern lebten.— Die in dem Körper erwachsener Tiere ferner gefundenen jungen Wesen gleicher Art, liefern zum Teil den Beweis, daß ihre Träger lebendig gebärten, denn diese Jungen hatten die typische Lage von Embryonen, d. h. den Kopf in der Beckengegend der Mutter, den Leib entlang der Wirbelsäule gegen die Brust; andere Junge aber, die andere Lage haben, hat **Branca** für gefressene Junge erklärt; das eine schließt ja das andere nicht aus. — Die Ichthyosauren lebten wahrscheinlich gesellig und werden zuweilen in einen dichten fossilen Schlammantel eingehüllt gefunden, ein Beweis nach **Gadow** dafür, daß sie nach dem Absterben auf dem Meeresboden von den Wellen der Brandung hin und her gerollt wurden, zugleich ist das aber ferner auch (**Trn.**) ein Beleg dafür, daß sie im Leben mit einer Schleimschicht überzogen waren, die den Schlamm beim Umherrollen der Tiere festhielt. Sie bewohnten die Erde von der mittleren Trias an bis in die obere Kreide. Aber nicht nur in der Zeit, sondern auch über die Erdoberfläche waren sie weit verbreitet, denn sie sind bereits für Europa, Nordamerika, Indien, Australien, Neuseeland, Patagonien nachgewiesen worden. — Bei der Aufstellung der Gattungen werden vor allem die Ausbildung der Flossen, Zähne und Rippen berücksichtigt.

Gattung Mixosaurus: Das Schwanzwirbelendeist nur erst leicht nach unten gebogen. Die Unterarm- und Unterschenkelknochen sind noch verhältnismäßig lang; die Unterarmknochen (Fig. 28B) im besonderen noch länger wie breit und schließen einen Zwischenraum miteinander ein. An ihnen gelenken unten — wie bei den meisten anderen Gattungen — Radiale, Intermedium und Ulnare; und liegt neben diesen, noch frei und nur in der Handwurzel ein Pisiforme. — Die Hintergliedmaße ist zwar bedeutend schwächer als die vordere, aber verhältnismäßig kräftig. Die Zähne stehn in Zahngruben. Die Fundstellen sind: obere Trias der Südalpen und mittlere Trias von Spitzbergen. — Gattung Ichthyosaurus: Die Rumpfrippen sind zwei-, die des Schwanzes dagegen nur einköpfig. Das Schwanzende ist im Winkel niedergedrückt. Die Hintergliedmaße ist im Verhältnis zur vorderen auffällig schwach. Der Oberarm gelenkt aber auch hier nur erst noch mit Radius und Ulna, diese aber wie auch die Unterschenkelbeine sind sehr kurz, breiter wie lang und berühren einander ohne Zwischenraum. Das noch frei liegende Pisiforme ist vergrößert (Fig. 28Ar). Die Zähne sind zahlreich und stehen in gemeinsamer Rinne. Die Tiere lebten von der oberen Trias an bis zur Kreide und in großer Anzahl. Die schönsten Skelette stammen aus England, wo Lyme Regis und Yorkshire die Hauptfundstätten sind; dann vor allem aus Württemberg mit den Hauptstätten Boll und Holzmaden, und aus Franken. — Gattung Ophthalmosaurus: Die Augen sind sehr groß; kleine Zähne stehen nur noch vorn in den Kiefern. Die Schlüsselbeine stoßen unter Natausbildung aneinander. Die beiden Unterarmknochen (Fig. 28 C) sind zu rundlichen Platten umgewandelt, und die Handwurzel stößt daher mit dem Intermedium fast, mit dem Pisiforme (p) dagegen unmittelbar an den Humerus: Ischium und Pubis sind verwachsen, und nur das Foramen pubicum ist in dieser Platte vorhanden. Die Fundstellen sind: oberer Jura bis untere Kreide Englands. — Gattung Baptanodon. Die Zähne sind an Zahl gering, aber über die ganzen Kiefer verteilt. Die Schlüsselbeine verwachsen miteinander. Das Oberarmbein gelenkt unten mit 4 Knochen: mit Radius, Ulna, Intermedium und Pisiforme; das heißt die Unterarmknochen sind abnorm verkürzt. Die Gattung stammt aus dem oberen Jura Nordamerikas.

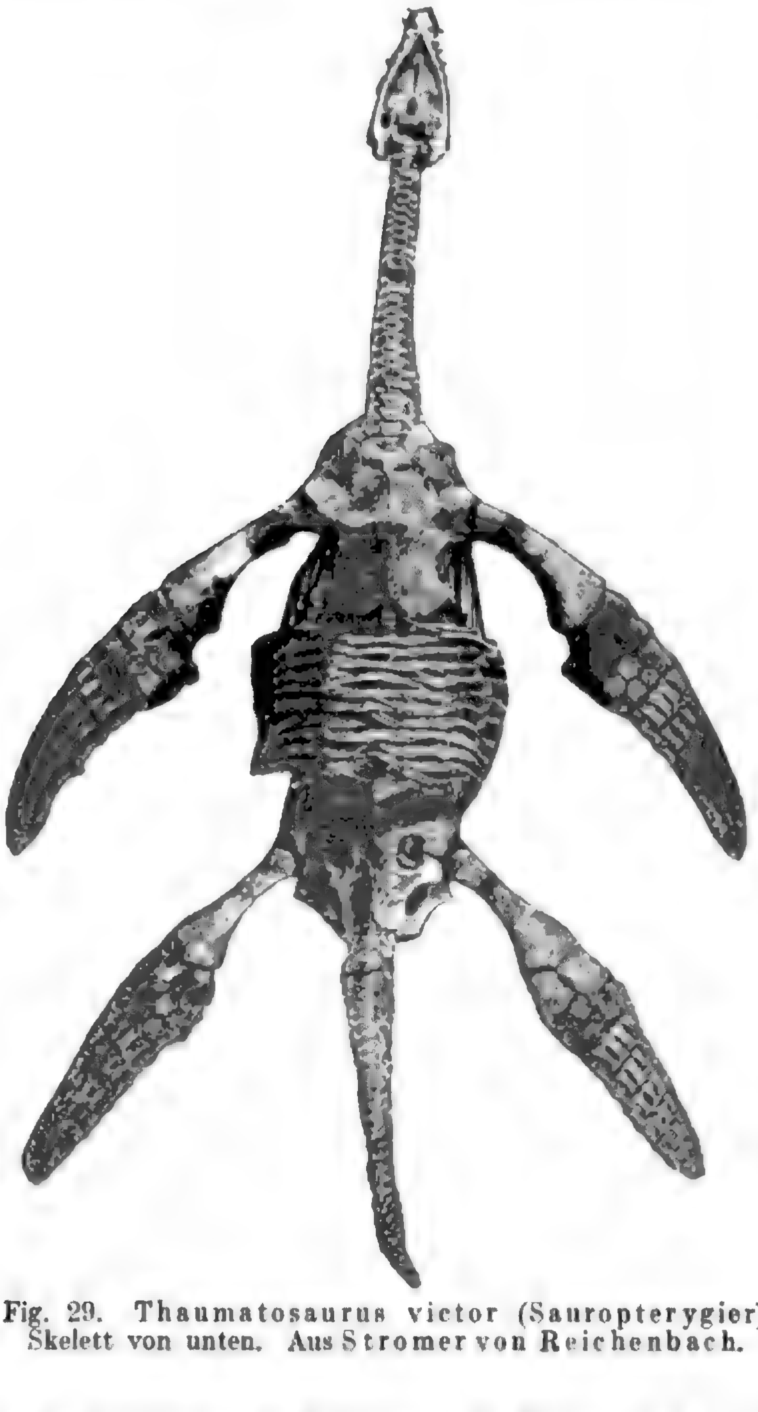


Fig. 29. Thaumatosaurus victor (Sauropterygier). Skelett von unten. Aus Stromer von Reichenbach.

6. Ordnung Sauropterygia, Schlangenhalsechsen. Hauptcharaktere (Fig. 17 oben, 26, 29, 30, 31 und 33): Die Ordnung enthält für kräftiges Rudern mit den Gliedmaßen eingerichtete Strandbewohner bis zu extremsten Gliedmaßen-Schwimmspezialisten des Meeres (Fig. 17 oben und 29). Letztere haben alsdann kleinen Kopf, kurze Schnauze, ganz auffällig langen Hals, kurzen Schwanz und zu starren Ruderplatten umgewandelte fünfzehige Vorder- und Hinterfüße, deren Zehen durch Zehengliedereinlagerung verlängert sind. — Sonstige wichtige Charaktere sind: Der kleine Schädel (Fig. 26) hat nur die obere Schläfenöffnung, ferner ein Scheitelaugenloch und ein gut entwickeltes unteres Munddach (Fig. 30, 31 und 33). Das Quadratbein ist dem Schädel unbeweglich angefügt. Die Außennaslöcher sind ungetrennt und liegen dabei wie die inneren dicht an den Augen. Die

kräftigen Zähne stehen in Zahngruben, aber nur an den Kiefern, denn am Munddach fehlt die Bezahnung. Die Wirbel sind schwach bikonkav und platt; die Rumpfrippen einköpfig und gelenken mit den Wirbelkörpern. Die Gliedmaßengürtel sind sehr kräftig entwickelt, wie die Gliedmaßen auch, da diese allein die Fortbewegung vermitteln. Die Gliedmaßengürtelhälften stoßen daher in der Mittellinie in kräftigen Symphysen aneinander. Die Finger- und Zehengliederzahl ist bei den extremen Formen sehr beträchtlich. Das Kreuzbein enthält 2 bis 6 Kreuzbeinwirbel. Zwischen den Gliedmaßengürteln liegt ein mächtiges Bauchknochenband, dessen einzelne Spangen aus 3 bis 5 Stücken zusammengesetzt sind. Die Tiere waren nackthäutig und von der Trias an, besonders aber in Jura und Kreide, sehr häufig, und über alle Weltteile verbreitet. Dann sterben sie, ohne umgewandelte Nachkommen zu hinterlassen, aus.

Sonst wäre noch zu bemerken: Die Augen haben nur zuweilen einen Skleralring. Das untere Munddach reicht bis weit nach hinten. Unter den Zähnen sind oft einige stark vergrößert. Es können von 13 Halswirbeln an bis über 70 vorhanden sein, 20 bis 30 Rumpfwirbel, 2 bis 6 Kreuzbein- und etwa 40 Schwanzwirbel. Schlüsselbeine sind vorhanden oder fehlen; ein kleines Episternum liegt stets zwischen ihnen.

Diese Schlangenhalsechsen zerfallen in 3 Familien. 1. Familie Nothosauridae (Fig. 30): Es sind wenige dm bis 3 m lange Tiere. Das Coracoid ist mächtig breit. Die kräftigen Schlüsselbeine werden durch das Episternum fest verbunden. Die Gliedmaßen konnten zum Gehen noch benutzt werden, denn sie haben ansehnliche Länge, besonders im Oberarm und Unterschenkel, und die 5 Zehen haben keine überzähligen Zehenglieder. Das lange untere Munddach der Tiere ist völlig geschlossen. Der Hals ist schon stark verlängert, hat aber nur erst wenig über 20 Wirbel. Das Kreuzbein besitzt 3 bis 6

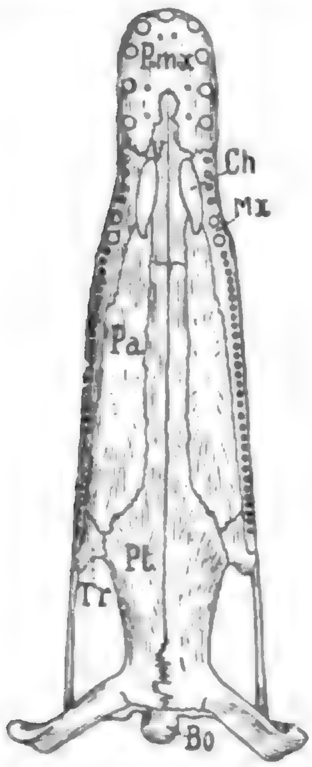


Fig. 30.

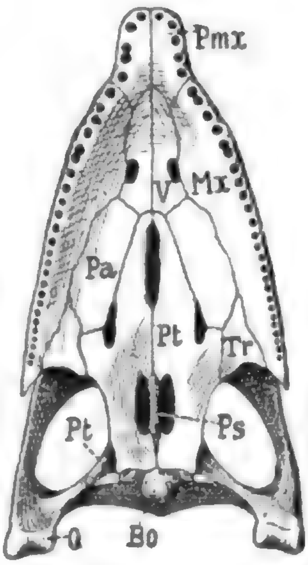


Fig. 31.

Fig. 30. **Nothosaurus mirabilis.** Schädel von unten. Pmx Prämaxillare, Mx Maxillare, Bo Suboccipitale, Tr Transversum, Pa Palatinum, V Vomer, Ch Binnennasloch. Aus Zittel-Broili.

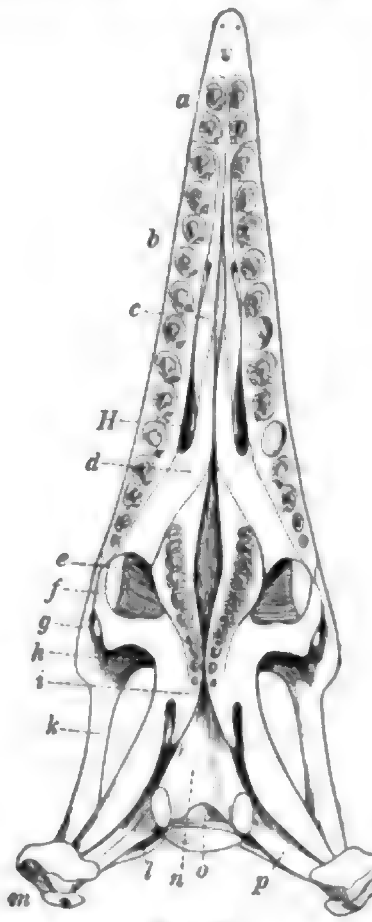


Fig. 32.

Fig. 31. **Thaumatosaurus victor.** Schädel von unten. Bo Suboccipitale, Ps Rostrum, Q Quadratum, Pt Pterygoid, Tr Transversum, Pa Palatinum, V Vomer, Mx Maxillare, Pmx Prämaxillare, Ch Binnennasloch. Nach E. Fraas.

Fig. 32. **Tylosaurus proriger (Mosasaurier).** Schädel von unten. a Praemaxillare, b Maxillare mit Zähnen auf Sockeln, z. T. im Zahnwechsel, c Vomer, d Palatinum, H Binnennasloch, e Frontale, f Transversum, g Jugale, h Postfrontale, i Pterygoideum bezahnt, k Quadratojugale, l Squamosum, m Quadratum, n Basisphenoid, o Suboccipitale mit Hinterhauptshöcker, p Lactroccipitale.

Wirbel. Die Tiere selbst sind fast nur aus der mittleren Trias Deutschlands und der Alpen bekannt.

Gattung Nothosaurus: Der Schädel ist hier im ganzen langgestreckt, besonders aber in jenem Teil, der von den Augen an bis zum Hinterhauptsloch reicht. Es sind 2 Prämaxillaren und Nasalia, dagegen nur ein Frontale und Parietale vorhanden, das aber ein Scheitelaugenloch trägt. Das Maxillare ist winzig und liegt zwischen Nasen- und Augenhöhle. Die Augen sind klein und ohne Skleralring und ihnen liegen die Außen- und Innennaslöcher ziemlich dicht an. An der Schnauzenunterseite (Fig. 30) reicht das untere Munddach von der Schnauzenspitze bis zum Hinterhauptshöcker und wird durch die Praemaxillaren, Vomera (die auch miteinander verwachsen können), Palatinen, Pterygoide und Transversa gebildet. Die Zähne sind kegelförmig, längsgerieft und stehen in Zahngruben. Die vorn in der Schnauze befindlichen Zähne und einige in den Maxillaren sind besonders lang und kräftig. Die Wirbelkörper und ihre oberen Bogen sind nicht miteinander verwachsen.

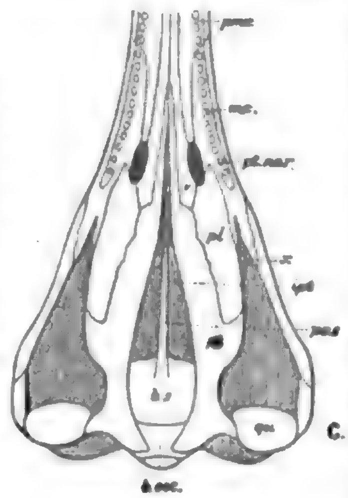


Fig. 33. Ichthyosaurus. Schädel von unten. pmx Praemaxillare, mx Maxillare, v Vomer, pt. nar. Binnennaslöcher, pa Palatinum, pt Pterygoid, bs Basisphenoid, pas Rostrum am Basisph., b. occ. Suboccipitale, qu Quadratum, x Augenhöhle. Nach Woodward.

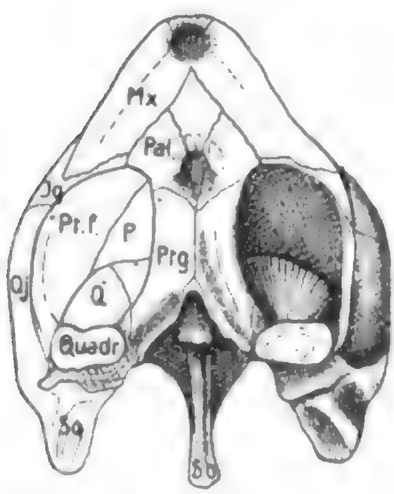


Fig. 34. Thalassochelys caretta. Schädelunterseite. Mx Maxillare, Pal Palatinum, Ptg Pterygoid, V Vomer, P Parietale, Ptf Postfrontale, Jg Jugale, Q Quadratum, Qj Quadratojugale, Sq Squamosum, So Supraoccipitale, Quadr Gleite des Quadratum für den Unterkiefer. Nach Gadow.

Der Hals hat 22 Wirbel, welche mit Ausnahme von Atlas und Epistropheus zweiköpfige Rippen an den Wirbelkörpern tragen. Die Rumpfrippen dagegen sind einköpfig und sitzen an kräftigen Querfortsätzen der oberen Wirbelbogen. Die äußerst kräftigen Bauchbandspangen bestehen aus einem winkligen Mittel- und je einem daran befestigten Seitenstück. Das Oberarmbein hat ein inneres Condyloidloch. Die Gliedmaßen und ihre Gürtel sind kräftig. Die Gattung ist auf die obere Trias beschränkt und tritt besonders häufig im oberen Muschelkalk und der Lettenkohle, vor allem Deutschlands auf. Die Art N. mirabilis besitzt 3 m lange Vertreter. — Gattung Lariosaurus: Diese eidechsenartigen Tiere, mit langem Hals von etwa 20 Wirbeln und kräftigen fünfzehigen Gehfüßen mit Ruderbefähigung sowie eidechsenartigen Fingergliedern, haben längere Hinter- wie Vordergliedmaßen und 5 Kreuzbeinwirbel. Ihre Bauchbandspangen sind aus 3 Elementen zusammengesetzt. Sie stammen aus der Alpentrias der Lombardei. — Gattung Neusticosaurus: Die Arten sind noch eidechsenartiger als die der vorigen Gattung; der Hals ist noch kürzer und hat nur 16 Wirbel; auch sind hier nur 3 Kreuzbeinwirbel vorhanden. Fundorte sind die Lettenkohle Schwabens und die Alpentrias der Lombardei.

Familie Plesiosauridae (Fig. 29 und 30). Es sind Tiere von ansehnlicher Größe und zwar bis über 12 m Länge; dabei ferner extreme Gliedmaßen — Schwimmspezialisten, mit Vorder- und Hinterfüßen, die zu festen Ruderplatten mit ganz verkürzten und stark verbreiterten Unterarmen und Unterschenkeln und mit überzähligen Fingergliedern umgebildet sind. Die Schlüsselbeine und das Episternum sind hier verhältnismäßig schwach entwickelt. Die eigenartigen Verhältnisse des Schultergürtels werden dabei gewöhnlich wie folgt geschildert: Schlüsselbeine und Episternum sind zugunsten der stark entwickelten Akromialfortsätze der Schulterblätter reduziert, da diese eine gegenseitige Vereinigung miteinander in der Bauchmittellinie und daselbst auch mit den vorderen Fortsätzen der großen, plattenförmigen, in einer Symphyse zusammenstoßenden Coracoidea erstreben, und dies auch in extremen Fällen erreichen, so daß sie alsdann mit dem Coracoid ihrer Seite je ein rundes Loch einschließen. In Wirklichkeit dürfte es sich um folgendes handeln (Trn): In jeder Schultergürtelhälfte ist, wie bei den Schildkröten, das Postcoracoid ganz selbständig, das Intercoracoid dagegen vom Schulterblatt noch gar nicht getrennt. Bei den primitiven Formen ferner ist dieses Intercoracoid in seinem, der unteren Körpermittellinie zugekehrten Ende knorpelig, bei extremeren Tieren dagegen verknöchert, und dann stößt es mit dem Coracoid zusammen und schließt mit ihm ein Fenster ein. Das Coracoid ferner dürfte seine riesige Breite auf Kosten des Sternums erworben haben, daß mit 2 seitlich nebeneinander liegenden Knochenkernen ver-

knöcherte und von denen dann jeder Knochenkern mit dem benachbarten Coracoid verwuchs. — Die Wirbel sind schwach bikonkav oder biplan. Der Hals hat deren mindestens 20, und die der Brust haben lange Querfortsätze, an denen die Rippen gelenken. Das Kreuzbein ist sehr minderwertig entwickelt, denn es besteht nur aus einem oder zwei Wirbeln. Die Tiere lebten in der mittleren und oberen Trias, vor allem aber im Jura Europas, auch Nordamerikas und Indiens, und waren in der Kreide über fast die ganze Erde verbreitet, dann sterben sie aus.

Die Familie enthältzahlreiche Gattungen, so die Gattung Pliosaurus, mit Arten von Riesengröße, wobei schon der Kopf bis 1,3 m lang wird. Sie haben kurzen Hals und ungefähr 20 Wirbel darin mit zweiköpfigen Rippen. Die Intercoracoidea stoßen nicht in der Körpermitte aneinander. Gefunden sind sie im Lias bis zum obersten Jura Englands, Frankreichs, der Schweiz, Bayerns, Rußlands und Indiens (Art: P. grandis, England). — Gattung Plesiosaurus: Der Kopf ist klein mit kurzer Schnauze. Der Hals ist gewaltig lang, bei manchen Arten nämlich gleich der Länge der übrigen Teile der Wirbelsäule und besteht aus 28 bis 50 Wirbeln. Der Schwanz ist kurz, hat aber noch 40 bis 50 Wirbel. Die Zähne sind zugespitzt, kegelförmig, fein gestreift, bis tief längsgefurcht und stehen in tiefen Gruben. In der Schnauzenspitze außerdem sind gewöhnlich einzelne stark vergrößert. Das untere Munddach ist nicht völlig geschlossen, sondern besitzt noch einzelne Lücken. Die Unterkieferhälften sind in der Symphyse fest verwachsen. Die Intercoracoidea stoßen in der Körpermittellinie nicht zusammen. Der dritte Finger hat 9 bis 10 Glieder. Die Bauchbandspangen sind sehr stark und bestehen aus einem Mittel- und 2 bis 5 Seitenstücken; sie füllen ferner dicht aneinander gedrängt den Raum von der Brust bis zum Beckengürtel völlig aus. Es sind nur 2 Kreuzbeinwirbel vorhanden. Die Vertreter der Gattung stammen aus der oberen Trias, ihre stärkste Verbreitung haben sie aber im Lias; und in der unteren Kreide sterben sie ohne veränderte Nachkommen aus. Arten sind: P. dolichodeirus, P. conybeari und P. Guilelmi imperatoris; letzterer als vollständiges Skelett in Berlin. — Gattung Elasmosaurus (Fig. 17, oben) hat Vertreter von über 13 m Länge. Der Hals ist hier übertrieben lang und gestreckt, und hat 60 bis 72 Wirbel. Die Rippen sind einköpfig. Die Intercoracoidea berühren sich in der unteren Bauchmittellinie und umschließen mit ihrem Coracoid ein Fenster. Der Schwanz ist kurz. Das Pisiforme gelenkt mit dem Oberarmbein. Die Vertreter der Gattung stammen aus der oberen Kreide Nordamerikas. — Andere Gattungen sind: Thaumatosaurus (Fig. 29, und 31 Schädelunterseite), Simolestes und Tricleidus.

Familie Mesosauridae (= Proganosauria). Diese Familie, wie die nächstfolgende werden von den meisten Autoren in die Ordnung Ichthyosauria eingereiht oder ihr als verwandt angefügt; ihre Stellung im System ist aber noch durchaus unsicher. Sie selbst umfaßt nur 2 Gattungen aus Süßwasserablagerungen des Perm in Südafrika und Brasilien. Es sind Tiere von nur Mittelgröße mit langschnauzigem Schädel, in welchem die Außennaslöcher voneinander getrennt und den Augen nahe liegen. Die Zähne der Kiefer sind lang, stehen kammartig dicht in Zahngruben nebeneinander, und auch der



Fig. 35. Rückenpanzer von Trionyx-styriacus. Miocäne Braunkohlenschichten von Eibiswald, Steiermark. Die rauhen Hautknochen des Rückenpanzers haben sich auf der rechten Schalenhälfte von den Rippen abgelöst. (Nach Peters.)

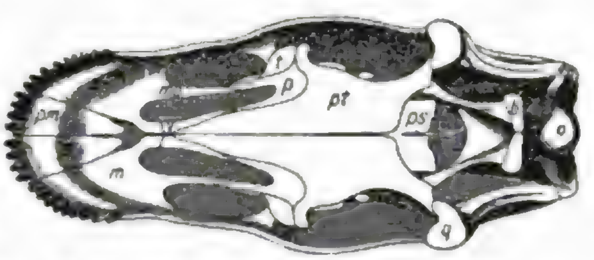


Fig. 36. Diplodocus. Schädelunterseite. pm Prämaxillare, m Maxillare, v Vomer, mp Binnennasloch, p Palatinum, t Transversum, pt Pterygoid, ps Präsphenoid, q Quadratum, b Basisphenoid, o Suboccipitale, eo Latroccipitale. Nach Woodward.

Vomer ist mit kleinen Zähnen besetzt. Das Hinterhaupt der gefundenen Schädel ist nicht bekannt, doch dürfte wohl nur ein oberes Schläfenloch vorhanden sein. Die Wirbelkörper sind bikonkav und werden von der Chorda durchbohrt. Die Rippen sind auffällig dick, einköpfig und vom Epistropheus an bis zum Schwanz vorhanden. Der Hals ist nur kurz und umfaßt etwa 10 Wirbel. Die Gliedmaßen sind fünfzehig. Die Schlüsselbeine stark; das Episternum ist dagegen nur

klein. Der Oberarm besitzt ein inneres Condyloidloch. Der Schwanz ist lang.

Gattung Mesosaurus (Art tenuidens). Ihr Fundort ist das Perm Südafrikas. — Gattung Stereosternum: Sie hat 12 Halswirbel und stammt aus dem Perm Südamerikas.

Familie Placodontidae (Fig. 38 Schädelunterseite). Es sind Strandtiere oder Meeresbewohner, die mit pflastersteinartigen Knackzähnen Muscheln zu zerbeißen imstande waren. Leidlich gut ist aber nur ihr Schädel bekannt, der von oben her abgeplattet erscheint. Er besitzt ferner nur das obere Schläfenloch, das fast rein nach oben gerichtet und von beträchtlicher Größe ist, und dazu ein Scheitelaugenloch. Im unteren Munddach sind der unpaare Vomer, die Palatina und Pterygoidea miteinander zu einer einzigen mächtigen Knochenplatte verwachsen und die Binnennaslöcher münden seitlich vom Vomer in den Mund. Jedes Gaumenbein ist mit wenigen sehr großen, pflastersteinartigen Knackzähnen versehn, unter denen Ersatzzähne liegen und deren Kronen aufgewölbt oder geriefelt erscheinen. Auch die Oberkieferbeine tragen je eine Reihe von rundlichen, wenn auch kleineren, dem Kieferrande aufgewachsenen Knackzähnen und auch jeder Unterkieferast hat im hinteren Abschnitt mehrere Knackzähne und dazu einen mächtigen Kronfortsatz. Die Wirbel sind flach bikonkav. Die Tiere selbst stammen aus der Trias Mitteleuropas. — Sonstige Charaktere sind: Die getrennten Außennaslöcher und die Augen liegen seitlich am Kopf. Die Prämaxillaren und die Spitze des Unterkiefers können einige in Gruben sitzende Schneidezähne tragen oder aber zahnlos sein; und waren, wenn zahnlos, wahrscheinlich mit einem Hornschnabel bekleidet. Die Tiere besaßen einen Rückenpanzer aus Knochenplatten, die Höcker und Dornen nach außen emporsandten. — Wegen des Baus der Schädelunterseite, sowie wegen der ganz flach bikonkaven Wirbel werden sie zu den Sauropterygiern gerechnet; andere Autoren stellen sie zu den Anomodontien; oder wegen des Rückenpanzers zu den Schildkröten. —

Gattung Placodus (Art gigas). Der Schädel (Fig 38) ist herzförmig, weil die Schläfenbögen hinter den Augen weit nach außen vorspringen und sich dann nach hinten einschlagen. Die

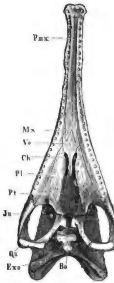


Fig. 37. Phytosaurus (Belodon) Kapffi Schädel von unten. Pmx Zwischenkiefer, Mx Maxillare, Qu Quadratum, Ju Jugale, Vo Vomer, Pl Palatin, Pt Transversum; das Pterygoid schließt sich nach innen an und ist beschattet. Bo Suboccipitale, davor das Basisphenoid, Ch Binnennasloch.

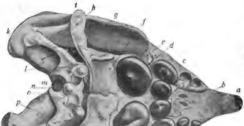


Fig. 38. Schädelunterseite von Placochelys. a Prämaxillare, b Vomer, daneben enge Choanen ergänzt, c Maxillare mit 3, d Palatinum mit 2 Mahlzähnen, e ? Transversum, f Pterygoideum wie d bis zur Mediane ausgedehnt, g Jugale, h Quadratum, i Quadratojugale, k Squamosum, l Parietale, m Foramen magnum, n Occipitale basale mit Condylus, o Occipitale laterale, p ? Epioticum oder ? Opisthoticum. Aus Stromer von Reichenbach.

Pterygoidea gehen mit hinteren flügelartigen Fortsätzen sehr weit nach hinten und erinnern dadurch an die Schildkröten und Krodokile. Vorn in der Schnauze und auf der Unterkieferspitze stehen jederseits 2 meißelartige Schneidezähne; im Oberkiefer 4 bohnenartige-; am Palatin und Unterkiefer je 3 mächtige Knackzähne; alle von tiefschwarzer Farbe. Gefunden sind diese Schädel, wie einzelne Zähne im Muschelkalk von Deutschland und Frankreich, ganze Schädel im besonderen zu Bayreuth. — Die Gatt. Cymodus ist der vorigen ähnlich und stammt auch aus dem Muschelkalk Deutschlands. — Bei der Gatt. Placochelys (Fig. 38) tragen die Schnauzen- und Unterkieferspitze keine Schneidezähne, und waren wohl im Leben mit einem Hornschnabel bedeckt. Jedes Maxillare hat 3, Palatinum 2, der Unterkiefer je 3 Knackzähne. Der Hinterrand des Squamosum ist mit kegelförmigen Knochenhöckern besetzt. Es sind 7 bis 10 Halswirbel, etwa 12 Rumpf- und 10 bis 15 Schwanzwirbel vorhanden. Die Gliedmaßen waren von ansehnlicher Länge und die Hauptgliedmaßenknochen sollen keine Epiphysen besitzen. Es ist ferner ein völlig geschlossener Rückenpanzer vorhanden, der aus Knochenplatten von verschiedener Größe gebildet wird, die nach außen bucklig und höckerig emporragen; er wird von kräftigen Rippen getragen. Auch ist ein ebenfalls geschlossener Bauchpanzer vorhanden. Die Gattung selbst stammt aus dem Keuper Ungarns.

7. Ordnung Parasuchia, Nebenkrokodile. Die Ordnung (Fig. 39 und 37) besteht dem äußeren Ansehen nach aus krokodilartigen Tieren, da ihre Hauptvertreter auf dem Rücken einen Hautpanzer aus Längsreihen von Lederhautknochen besitzen und eine langgestreckte Schnauze aufweisen können, und sicher auch wie Krokodile lebten. Sie sind aber sofort deshalb von ihren Vorbildern zu unterscheiden, weil ihre Naslöcher nicht an der Schnauzenspitze, sondern dicht vor den Augen liegen. Die Schnauzenverlängerung nämlich wird bei ihnen durch Vergrößerung der Zwischenkieferbeine, und nicht wie bei Krokodilen, durch Verlängerung der Maxillaren hervorgerufen. Auch sind sie in einer ganzen Reihe von Charakteren primitiver als diese. Denn sie haben nur ein ganz mangelhaft ausgebildetes unteres Munddach (Fig. 36), die Binnennaslöcher münden deshalb neben den Vomerbeinen in den Mund. Sie haben ferner Schlüsselbeine von guter Ausbildung, und es bleiben bei ihnen Ileum, Pubis und Ischium voneinander getrennt und bilden alle drei zusammen die Gleite für den Oberschenkel. — Mit den Krokodilen gemein aber sind ihnen: am Schädel ein oberes und unteres Schläfenloch; die starken Zähne sind kegelförmig und sitzen in Zahngruben der Kiefer; Munddachzähne fehlen, und die Unterkieferhälften stoßen in einer langen Knochenfuge unbeweglich aneinander. Mit den (niedrig stehenden) Krokodilen sind ihnen ferner gemeinsam die schwach bikonkaven Wirbel, zweiköpfige Rippen, das Kreuzbein mit 2 Wirbeln, ein Bauchknochenband und endlich fünfzehige Schreitfüße mit Schwimmbefähigung. — Sonstige Charaktere sind: Alle Knochen des Schädeldachs sind paarig, und zuweilen ist ein Scheitelaugen-

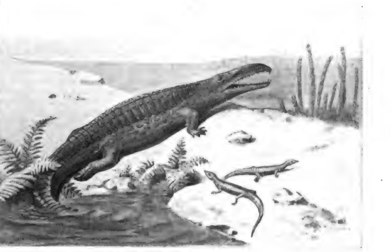


Fig. 39. Phytosaurus und 2 Aetosaurus. Nach Hutchinson.

loch vorhanden. Zwischen Außennasloch und Augenhöhle jeder Kopfseite liegt im Schädel ein großes Schnauzenseitenloch (Präorbitalloch). Das Quadratbein ist unbeweglich mit dem Schädel verbunden. Die Augen haben keinen Skleralring. An den Schwanzwirbeln sind untere Wirbelbogen vorhanden. Das Episternum ist auch da und eine einfache dolchartige Platte. — Es gibt kurz- und langschnauzige Formen. Die Trias enthält ihre Fundstätten.

Die Tiere haben durch eine Reihe der aufgezählten Schädelcharaktere und durch den Besitz von Schlüsselbeinen Beziehung vor allem zu den Rhynchocephalen, deren Gatt. Protorosaurus ihnen am nächsten stehen soll, in anderen Charakteren, wie schon erwähnt, zu den Krokodilen und in einigen zu der hier nachfolgenden Dinosaurierfamilie Plateosauridae (Gadow; v. Huene), doch dürfte das letztere keine nähere Verwandtschaft mit diesen begründen (Trn.).

Nach dem Nasen- und Schnauzenbau werden 2 Familien mit nur wenig Vertretern unterschieden. Fam. Aetosauridae (= Pseudosuchia). Es sind (Fig. 39 rechts) meist kleine Tiere mit entschieden kurzer und oft sehr spitzer Schnauze. Die Zwischenkieferbeine sind sehr klein und oben durch die großen Nasenbeine getrennt, welche auch die Oberkieferbeine oben auseinander halten. Die Außennaslöcher liegen deshalb ganz vorn an der Schnauze, außerdem seitlich und zwischen Nasen-, Oberkiefer- und Zwischenkieferbein ihrer Kopfseite. Seitlich am Kopf hinter jedem Nasloch liegt dann ferner ein großes Schnauzenseitenloch (Präorbitalloch) und dahinter die sehr große Augenhöhle. Das Präorbitalloch ist dabei umschlossen vom Tränen- und Oberkieferbein. Ein unteres Munddach ist nur erst sehr unvollkommen entwickelt, denn es stoßen in demselben nur die Zwischenkiefer und der Vomer zusammen und daher liegen die Binnennaslöcher gewöhnlich noch weit vorn. Zähne sind nur vorn auf den Kiefern vorhanden. Die Wirbel sind bikonkav oder biplan und zum Kreuzbein gehören 2 bis 4. Auf der Rückenseite des Tieres ferner vom Nacken an bis auf den Schwanz liegen 2 Hauptreihen großer, breiter, dicht aneinander gefügter Hautknochen; kleine Hautknochen decken auch die Körperseiten und den Bauch. Die Tiere ferner sind $^1/_2$ bis 2 m lang und stammen aus der oberen Trias Württembergs, Schottlands, Südamerikas und wahrscheinlich auch der vereinigten Staaten von Nordamerika.

Art Aetosaurus: Die Vertreter werden über $^1/_2$ m lang. Der Schädel ist dreieckig und spitzschnauzig und hat nur bis zur Mitte der Kiefer Zähne. Die Naslöcher, Schnauzenseitenlöcher und Augenhöhlen sind sehr groß. Der Körper und Schwanz haben eine zusammenhängende Hautpanzerbedeckung, und es liegen dabei auf dem Rücken 2 Längsreihen großer, vierseitiger Hautknochenplatten; und an den Körperseiten und dem Bauch, wo 8 Reihen vorhanden sind, kleinere fast quadratische. Alle Hautknochen sind dabei nur ganz wenig rauh. — Wahrscheinlich ist ferner bei Aetosaurus jederseits nur ein unteres Schläfenloch vorhanden. Der Schwanz besitzt ansehnliche Länge. — Es wurden im Stubensandstein von Heßlach bei Stuttgart auf einer einzigen Platte 24 vollständig erhaltene Vertreter der Gattung von verschiedener Größe gleichzeitig gefunden. Sie sind in wundervollem Erhaltungszustand und viele von ihnen in ungemein lebensechter Haltung, „geradeso als wenn zuerst eine Sandsteinmasse auf sie gefallen wäre und sie niedergedrückt hätte, in der sie dann bei Fluchtversuchen abstarben". — Gattung Erpetosuchus: Die Schnauze ist mäßig lang und zugespitzt. Die Augen sind nach oben und vorn gerichtet. Die Binnennaslöcher liegen weit vorn, die kegelförmigen Zähne sind nach hinten gekrümmt. Auf dem Rücken liegen 2 Hautknochenreihen. Fundort ist die obere Trias von Elgin in Schottland. Andere Gattungen sind Ornithosuchus und Scleromochlus und stammen beide ebenfalls aus dem Triassandstein von Elgin in Schottland.

Familie Phytosauridae (Belodontidae, Fig. 39 und 37, Schädelunterseite): Die Prämaxillaren sind ungemein stark verlängert und bilden im wesentlichen die Schnauze, so daß die Maxillaren und Nasenbeine sehr klein sind und die Außennaslöcher dicht vor den Augen liegen. Diese gehören dabei dem Schädelrücken an, sind voneinander getrennt, ferner wie die Augen rein nach oben gerichtet und liegen zunächst unmittelbar über den Binnennaslöchern, die also auch dicht vor den Augen liegen und ferner über dem mehr seitlich stehenden Schnauzenseitenloch ihrer Kopfseite. Die Binnennaslöcher liegen dabei vor den Palatinen und sind durch einen Vomerfortsatz getrennt; denn das untere Munddach der Tiere besteht nur erst aus Prämaxillar- und Vomerquerbrücken. Es sind ferner bei dieser Familie ein großes unteres und ein kleines oberes Schläfenloch vorhanden, von denen das untere nach außen schaut, das obere ganz nach hinten gerichtet ist. Die Wirbel sind bikonkav und 2 davon bilden das Kreuzbein. Auch ein Bauchband ist vorhanden. Es sind mehrere Meter lange Tiere aus der oberen Trias Württembergs und Englands, sowie aus der unteren von Anhalt und aus der Trias Nordamerikas, vielleicht auch Indiens.

Weil sie senkrecht übereinander liegende Außen- und Binnennaslöcher haben, die Nasengänge also senkrecht aus dem Mund aufsteigen, sowie durch ihre lange Schnauze und deren Bezahnung ähneln diese Tiere den Zahnwalen und waren diesen wahrscheinlich auch in der Lebensweise ähnlich.

Gattung Phytosaurus (= Belodon). Die

Vertreter (Fig. 39 und 37) haben Krokodilgröße und der über metergroße Schädel hat eine sehr große nach vorn schmal werdende Schnauze, die in ihrem Rückenabschnitt blasig aufgetrieben und runzlig ist. Das Scheitelaugenloch fehlt dem Schädel; die Augenhöhlen stehen rein nach oben. Der Rückenpanzer besteht aus 2 Reihen großer, stark verbreiteter Hautknochenplatten, die mit dicken strahligen Knochenrunzeln versehen sind. Und seitlich davon steht jederseits noch eine Reihe kleiner Platten; aber auch der Vorderabschnitt der Bauchseite hat Hautbepanzerung. Die Gattung stammt aus dem Stubensandstein des oberen Keupers von Württemberg, Franken und Braunschweig, und aus der Trias der vereinigten Staaten von Nordamerika. — Gattung Mesorhinus: Das obere Schläfenloch ist völlig knöchern umrandet. Das Scheitelaugenloch ist vorhanden. Die Binnennaslöcher liegen zwischen den Flügeln der Palatinen und Pterygoiden. Die Tiere stammen aus Bernburg in Deutschland. — Gattung Mystriosuchus: Die Schnauze ist langgestreckt und vorn löffelartig verbreitert, auch setzt sie sich von der Schädelkapsel scharf ab. Es sind zahlreiche schwach geriefte Zähne vorhanden, davon 23 bis 24 auf den Prämaxillaren. Der Rückenpanzer besteht aus 4 Reihen großer Hautknochenplatten, an der Unterseite ferner liegt ein Halspanzer, der aus 35 kleinen Platten besteht. Die Gattung wurde gefunden im Stubensandstein des mittleren Keupers von Württemberg.

8. Ordnung Crocodilia. Hauptkrokodile. Die wichtigsten Charaktere (Fig. 40, sowie Artikel „Reptilia") sind: Es sind zumeist große, eidechsenartig gestaltete, langschwänzige Tiere, die zum Schwimmen im Wasser mit Gliedmaßen und Schwanz und für Ernährung durch tierische Beute spezialisiert sind. Der massige Schädel ist mit 2 Schläfenlöchern, festgestelltem Quadratbein und einem gut ausgebildeten und sehr weit nach hinten reichenden unteren Munddach ausgestattet. Die Außennaslöcher liegen ganz vorn an der Schnauzenoberseite und sind miteinander vereinigt. Die Binnennaslöcher gleichfalls vereinigt, stehen entweder unter den Augen oder hinter denselben, d. h. wenigstens hinter den Palatinen oder gar zwischen den Pterygoiden. Die großen Zähne sind kegelförmig; zuweilen vorn und hinten scharfrandig, längs gerieft und sitzen in Zahngruben der Kiefer. Munddachzähne fehlen dagegen. Transversa sind stets vorhanden. — Sonstige wichtigere Charaktere sind: Der Schädel ist groß und plump, und hat mit Gruben und Knochenrunzeln überdeckte Oberfläche. Sobald sich die Schnauze stark oder sehr stark verlängert, geschieht das durch Längerwerden der Maxillaren (nicht Prämaxillaren). Die Maxillaren verdrängen dann die Nasenbeine von den Naslöchern, so daß zuerst bei kurzschnauzigen Tieren die Nasenbeine durch die Naslöcher hindurch bis zu den Prämaxillen reichen, darauf nur hinten noch an die Naslöcher stoßen, und zum Schluß, winzig klein geworden, weit nach hinten von ihnen entfernt liegen. Die Stirn- und Scheitelbeine sind wenigstens bei älteren Tieren verwachsen und ein Scheitelaugenloch fehlt. An der Ausbildung des unteren Munddachs nehmen teil die Prämaxillaren, zuweilen die Vomera (so bei Tomistoma und Caiman niger), dann die Palatina und in vielen Fällen selbst die Pterygoiden. Die Augen haben zumeist keinen Skleralring. Es ist ein Bauchknochenband vorhanden. Es fehlen die Schlüsselbeine und vom Intercoracoid ist nur der Processus praecoracoideus vorhanden, der mit dem Postcoracoid das Foramen coracoideum einschließt. Ebenso hat das Schulterblatt einen Processus praecoracoideus. Der Unterkiefer wird aus mehreren Knochen gebildet, und an der Symphysenbildung der Unterkieferhälften nehmen bei den langschnauzigen Arten auch die Spleniale (Opercularen) teil. Im Beckengürtel wird die Oberschenkelgleite, die in der Mitte eine große Durchbohrung besitzt, nur durch das Ileum und Ischium gebildet, die nicht nur hinter, sondern auch vor der Gleite eine Naht miteinander bilden, und das Pubis derartig verdrängt haben, daß es oben mit dem Ischium gelenkt.

Wichtigere Charaktere sind ferner: Die Wirbel sind entweder bikonkav, oder konkavkonvex (procöl), oder biplan. Die oberen Wirbelbogen bleiben gewöhnlich vom Wirbelkörper durch Naht abgegrenzt. Es sind große obere Dornfortsätze, vor allem aber am Schwanz, und daselbst auch noch lange untere Dornfortsätze auf unteren Wirbelbogen vorhanden. Am Hals und im Rumpf sitzen zweiköpfige Rippen, dahinter einköpfige. Die Rumpfrippen gehen dabei von Querfortsätzen aus. Die Lendenwirbel haben große Querfortsätze ohne Rippen. Es sind gewöhnlich 2 Kreuzbeinwirbel vorhanden, die vermittelst Rippen das Becken tragen. Die 6 bis 9, das knorplige Brustbein tragenden unteren Rippenepiphysen sind knöchern (Sternocostalia). Das hier vorhandene Episternum ist eine fortsatzlose platte Knochenspange. Die Vorder- und Hintergliedmaßen sind vergleichsweise schlank und besitzen noch ausgiebige Tragfähigkeit. Die hinteren sind wesentlich leistungsfähiger und länger als die vorderen. Vorn sind 5, hinten 4 Zehen, denn der fünfte ist bis auf einen Rest seines Mittelfußknochens verschwunden. An der Handwurzel sind das Radiale und Ulnare auffällig lang und schlank, das Intermedium fehlt, und die zweite Handwurzelknochenreihe ist stark verkümmert. Im Hinterfuß ist ein Astragalus und ein Calcaneus mit wohlausgebildeter Hacke und Sustentaculum tali vorhanden (Trn.). In der zweiten Fußwurzelbeinreihe sind gewöhnlich nur 2 Knochen vorhanden. Die Zahl der Finger-

glieder von innen nach außen ist: 2, 3, 4, 5, 4; und die der Zehenglieder: 2, 3, 4, 4, 0.

Auf dem Rücken haben die Tiere zumeist mehrere aneinander stoßende Längsreihen von Hautknochenplatten mit grubig-runzliger Oberfläche; bei vielen kommen solche auch an der Bauchseite vor. — Nachweisbar sind die Krokodile vom unteren Jura an bis zur Gegenwart, in der noch zahlreiche Arten zu finden sind. Sie werden in 6 bis 7 Familien untergebracht.

Familie Atoposauridae (= Alligatorellidae). Es sind kleine ausgestorbene Süß- und seichtes Meerwasser bewohnende Tiere mit bikonkaven Wirbeln. Die Außennaslöcher sind durch eine Verlängerung der Nasenbeine geteilt. Die Schnauze ist kurz, und der Gesamtkopf dem Formeindruck nach mehr dem einer Eidechse wie dem der typischen Krokodile ähnlich. Die Augen sind groß und größer als die Schläfenlöcher. Der schwache Rückenpanzer beginnt in der Form von 2 Längsreihen von Hautknochen unmittelbar hinter dem Kopf. Ein Bauchpanzer ist bisher nicht nachgewiesen. Die Tiere selbst stammen aus der oberen Kreide und aus dem obersten Jura Europas und wohl auch Nordamerikas, wie auch aus Südamerika.

Die Gattungen Atoposaurus, Alligatorium, und Alligatorellus stammen alle drei aus dem oberen Jura von Frankreich und der Oberpfalz.

Familie Goniopholidae. Verhältnismäßig kurz- und breitschnauzige echte Krokodile; aber Meerbewohner. Die Binnennaslöcher sind noch langgestreckt, werden aber bereits von den Palatinen und Pterygoiden begrenzt. Die Nasenbeine stoßen nicht mehr an das Außennasloch, und im Unterkiefer beteiligen sich die Splenialen (Opercularen) an der Symphysenbildung der Kieferhälften. Die Wirbelkörper sind biplan (platycöl). Der Panzer ist stark, und sind die auf dem Rücken vorhandenen 2 oder mehr Reihen von Hautknochenplatten gelenkig miteinander verbunden. Die Fundstätten der Familienvertreter liegen im obersten Jura sowie in der Kreide und im Eozän Europas, wohl auch Nordamerikas; zumeist aber im Purbeck und Wealden Europas.

Gattung Goniopholis: Sie ähnelt dem derzeitigen Nilkrokodil und wird bis 2 m lang. Der Oberkiefer trägt ein Paar tiefer Gruben als Platz für die darunter liegenden vergrößerten Unterkieferzähne (Eckzähne), wenn der Mund geschlossen wird. Außer dem zweireihigen Rückenpanzer ist ein Brustpanzer vorhanden und besteht aus 6 bis 8 Längsreihen allseitig miteinander gelenkig verbundener Platten. Die Arten: G. simus und crassidens stammen beide aus dem oberen Jura Nordamerikas sowie Purbeck und Wealden Europas.

Familie Pholidosauridae: Es sind lang- und schlankschnauzige süß- und brackwasserbewohnende Gavialkrokodile, deren Schnauze stark vom Schädel abgesetzt ist. Die Nasenbeine sind schmal und sehr spitz nach vorn auslaufend, so daß sie dort mit den ähnlich spitzen Prämaxillaren aneinander stoßen. Die Augen liegen seitlich am Kopf; die Binnennaslöcher zwischen Palatinen und Pterygoiden. Rücken und Bauch sind gepanzert. Die Wirbel sind biplan (platycöl). Die Tiere selbst stammen aus dem oberen Jura und der unteren Kreide.

Gattung Pholidosaurus = Macrorhynchus. Aus dem Wealden von Hannover und England.

Familie Teleosauridae (Fig. 40). Es sind ausgestorbene Meerkrokodile von gavialartigem Aussehn, zumeist beträchtlicher Körpergröße und mit sehr langer und stark verschmälerter Schnauze. Die ganz vorn liegenden Naslöcher sind deshalb durch die Maxillaren von den sehr verkleinerten und ganz nach hinten gerückten Nasenbeinen weit getrennt, die Prämaxillaren umranden dabei die Naslöcher. Die Augen stehn schräg nach oben. Die Binnennaslöcher liegen am Hinterende der Palatinen. Die beiden Schläfenlöcher jeder Kopfseite sind groß und größer wie die Augenhöhle. Vor den Augen steht zuweilen noch ein kleines Präorbitalloch (Sublacrymalloch). Die Wirbel sind biplan (platycöl). Die Hintergliedmaßen fast doppelt so lang wie die vorderen. Der Rücken trägt 2 Längsreihen von großen Hautknochen, aber auch am Bauch stoßen zahlreiche Hautknochenplatten von geringerer Größe in mehreren Reihen gelenkig aneinander.

Gattung Teleosaurus: Die Schnauze (Fig. 40) ist sehr lang und dünn, und stark vor den Augen von der Schädelkapsel abgeschnürt. Die schlanken Zähne stehen fast horizontal nach außen in den Kiefern. Die Rückenplatten decken sich fischschuppenartig. Die Unterseite ist gleichfalls stark gepanzert und zwar durch eine viereckige, breite Brustdecke aus 4 Knochenplattenreihen und durch eine große, lange, eiförmige Bauchdecke, die aus ungefähr 6 Längs- und 7 Querreihen von Hautknochenplatten besteht. Dogger bis Malm in England und Frankreich lieferten die Funde. — Gattung Stenosaurus = Mystriosaurus: Die sehr verlängerte Schnauze ist vorn löffelartig verbreitert. Die Augen sind ganz nach oben gerichtet und desgleichen die Naslöcher. Bei manchen Arten ist auch ein kleines Schnauzenseitenloch vorhanden. Die Ringe der Luftröhre waren knöchern und werden zuweilen im Skelett als Ringe mitversteinert gefunden. Die Tiere selbst stammen aus dem oberen Lias von Frankreich und Deutschland.

Familie Metriorhynchidae (= Thalattosuchia), Gabelschwanzkrokodile: Es sind kurzhalzige Meerkrokodile ohne Hautpanzerplatten, deren Vorder- und Hintergliedmaßen (Fig. 41) mit massigem Innenrand und Innenzeh versehen sind, während die anderen Zehen auffallend schwachen Bau

zeigen. (Es ist das ein Beweis dafür, daß diese Tiere ihre Füße unter starker Drehung um die Längsachse als nach außen arbeitende Schaufeln beim Schwimmen bewegten. Trn.) Da bei den Tieren ferner, ähnlich wie bei den Ichthyosauren, das Schwanzende vom -vorderteil in einem Winkel nach unten abgeknickt erscheint, so besaßen diese Tiere

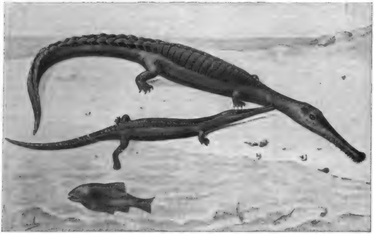


Fig. 40. Pelagosaurus (oben) und Teleosaurus. Nach Hutchinson.

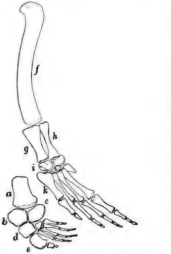


Fig. 41. Geosaurus suevicus (Crocodilia, Metriorhynchidae). Linke Vorder- und Hintergliedmasse, a Humerus, b Radius, c Ulna, d Handwurzelknochen, e Metacarpale und die zwei Glieder des ersten Fingers, f Femur, g Tibia, h Fibula, i Tarsalia, k Metatarsale des ersten Zehs.

wahrscheinlich eine Fettflosse über der Abknickstelle und der Schwanz war deshalb ein Gabelschwanz. — Die Schnauze ist nur mäßig lang und breit; die Außennaslöcher berühren deshalb bei manchen Arten noch die Nasenbeine. Die Binnennaslöcher liegen hinter den Palatinen. Die Augen besitzen Skleralringe. Die Wirbel sind biplan (platycöl). Die Fundstätte der Vertreter ist der obere Dogger und das Neokom.

Die Gattung Metriorhynchus hat zahlreiche Arten aus Frankreich, England, Patagonien. Die Gattung Geosaurus (Fig. 41 Gliedmaßen) stammt aus dem oberen Jura von Franken und Schwaben.

Familie Crocodilidae (= Crocodilidae und Gavialidae der meisten Paläontologen, welche Familien aber durch Mecistops cataphractus vereinigt werden). Die Familie enthält zahlreiche zurzeit noch lebende Vertreter, und über dieselben berichtet der Handbuchartikel „Reptilia". Die Schnauze der Crocodiliden ist kurz oder lang, bis überlang. Die Binnennaslöcher sind völlig von den Pterygoiden umrandet. Die Wirbel sind konkav-konvex (procöl). Die Augenhöhlen sind größer als die kleinen oberen Schläfenlöcher und stehn in ihrem Außenrandgebiet mit dem unteren Schläfenloch in Verbindung. Der Rückenpanzer besteht aus mehr als einem Paar von Hautknochenplatten, während die

Bauchbepanzerung nur gering entwickelt ist oder fehlt.

Gattung Diplocynodon: Die Zähne sind hier ungleich groß, der erste Unterkieferzahn paßt bei Mundschluß in eine darüber liegende Grube der Schnauze; der dritte und vierte legen sich dagegen bei Mundschluß dem Oberkiefer in einem seitlichen Ausschnitt außen an. Der Rücken- und Bauchpanzer sind stark entwickelt. Die Gattung ist häufig im Obermiozän bis Miozän Europas; und stammt aus dem Eozän Mexikos. — Gaviale wurden fossil aus Meeruferablagerungen der oberen Kreide und aus dem Tertiär bekannt; so die Gattung Thoracosaurus, deren Zwischenkiefer spatelartig erweitert ist; und ferner die Gattung Eosuchus, die keinen Bauchpanzer hat und aus dem Eozän Persiens stammt. — Die Gattung Tomistoma hat fossile Vertreter im Tertiär des Mittelmeergebiets und Ungarns. — Die Gattung Rhamphosuchus endlich (Art: crassidens) enthält riesengroße Gaviale von 15 m Länge, und ist aus dem Pliozän Ostindiens gewonnen.

9. Ordnung Pterosauria, Flederechsen (= Patagiosauria und Ornithosauria). Es sind dies (Fig. 42, 43 und 25) fleischfressende Flugspezialisten, und für diese Fortbewegungsart einmal durch den lufthaltigen Knochenbau und vor allem durch eine Flughaut (Patagium) befähigt, die von dem riesig entwickelten Außenfinger an der ganzen Hinterseite jeder Vordergliedmaße entlang bis zur Brust hinzieht und wegen ihrer Kleinheit kaum einen ruhigen Flügelschlag (Flug), sondern nur fledermausartige Flatter- oder Flederbewegungen gestattet haben dürfte. Zum Erwerb der tierischen Nahrung aber dient bei ihnen die abnorm verlängerte Schnauze, die entweder nach vorn gerichtete Bezahnung hat oder Hornbekleidung, wenn sie zahnlos ist.

Sonstige Hauptcharaktere der Ordnung sind: Die Augenhöhlen sind sehr groß und haben einen mächtigen Skleralring. Das Quadratbein ist unbeweglich am Schädel festgestellt. Es sind 2 Schläfenlöcher vorhanden. Der Kopf sitzt mit einfachem Condylus senkrecht auf der Wirbelsäule. Der Hals hat nur wenig Wirbel, aber auffällig verlängerte, und ist dadurch lang. Hals- und Brustwirbel sind konkav-konvex, die Schwanzwirbel bikonkav. Das Kreuzbein besteht aus 4 bis 10 zumeist verwachsenen Wirbeln, und stets sind Bauchrippen vorhanden, die jede aus einem Mittel- und zwei Seitenstücken bestehen. Schlüsselbeine und Episternum fehlen. Die Schulterblätter sind lang, säbelförmig und nach hinten gerichtet. In den Vordergliedmaßen liegen sowohl Radius und Ulna, wie auch die 4 Mittelhandknochen dicht aneinander, sind aber nicht miteinander verwachsen. Die Zahl der Handwurzelknochen ist gering, aber auch sie sind selbständig. Es sind an der Vordergliedmaße ferner 3 schlanke und kurze Innenfinger mit Krallen vorhanden, und dann folgt auf seinem mächtig verdickten Mittelhandknochen der riesig verlängerte äußerste „Flugfinger". Die 4 vorhandenen Finger haben von innen nach außen 2, 3, 4, 4 Fingerglieder. Die 4 Fingerglieder des Flugfingers sind dabei mächtig verlängert und stark und, wie es scheint, wenig gegeneinander beweglich. Wie schon erwähnt worden ist, zog an der ganzen Außenseite jeder Vordergliedmaße entlang bis zur Brust eine Flughaut hin, die, wie gut erhaltene Fundstücke aus Franken zeigen, zusammenfaltbar war, dagegen nicht die Hintergliedmaßen oder gar noch den Schwanz mit umschloß, wie man früher annahm. An jeder der Gliedmaßen ist also, wie aus obigem hervorgeht, ein Finger verloren gegangen, ob der erste oder fünfte ist noch nicht sicher. Ein kleines langgestrecktes Knöchelchen, das an der Innenseite der Handwurzel sitzt und mit der Spitze gegen das Ellenbogengelenk zeigt, wird von manchen Autoren als Rest des ersten Fingers angesehen, oder als Spannknochen einer auch an der Vorderseite der Gliedmaße vorhandenen Flughaut; ist aber ziemlich sicher, wie andere Forscher ähnlich vermutet haben, eine verknöcherte Strecksehne der Hand und damit des Flugfingers (Trn.).

Die Ilea sind am oberen Rand nach vorn und hinten stark verlängert und mit den 3 bis 10 Kreuzbeinwirbeln fest verwachsen, die wieder unter sich zumeist stark verwachsen.

Scham- und Sitzbein sind auch miteinander verwachsen und oft auch mit dem Hüftbein, und umschließen ein kleines Foramen pubo-ischiadicum. Ferner ist ein selbständiges Epipubis (praepubis oder pubis der Autoren) vorhanden, das am Pubis gelenkt und mit dem der anderen Seite zusammenstößt oder gar verwächst. Die Beckenhälften stoßen anscheinend in der Körpermittellinie nicht oder nur selten aneinander. — An den schlank gebauten Hintergliedmaßen ist die Tibia länger als der Oberschenkel, die Fibula ist bis zur Hälfte von unten her verkümmert und deshalb nur in ihrem oberen Abschnitt selbständig vorhanden oder mit der Tibia verwachsen oder fehlt anscheinend ganz. In der Fußwurzel sind 2 Knochenreihen übereinander vorhanden, von denen die obere mit dem Unterschenkel verwachsen kann. Die Mittelfußknochen ferner sind nicht verwachsen; die innersten 4 Zehen stets vollständig vorhanden, mit Krallen versehen und haben, vom innersten angefangen, 2, 3, 4, und 5 Zehenglieder. Der fünfte Zeh ist entweder krallenlos oder hat nur 2 verkümmerte Zehenglieder oder ist noch stärker abgebaut. — Die Hüllhaut war wahrscheinlich nackt; denn von Haut-

knochen ist jedenfalls bisher nichts entdeckt. — Als Nahrung der Tiere dienten wahrscheinlich Insekten und wohl auch Fische. — Die Flederechsen haben eine Reihe von Charakteren ähnlich denen der Vögel, das beruht aber nicht auf Verwandtschaft, sondern auf Konvergenz unter gleichen Lebensbedingungen. Die Herkunft dieser Tiergruppe ist noch ganz ungeklärt, denn ihre Vertreter wurden bisher stets nur als bereits vollendete Spezialisten aufgefunden. Ihre Fundstätten liegen dabei in der oberen Trias bis zur oberen Kreide, dann sterben sie, ohne weiter umgewandelte Nachkommen zu hinterlassen, ab.

Sonstige wichtigere Charaktere sind: Am Kopf verwachsen die Knochen so frühzeitig, daß ihre Beziehungen zueinander nur sehr schwer aufzuhellen sind. Die Prämaxillaren sind miteinander verwachsen und drängen sich zwischen die Nasenbeine, die dadurch nach den Kopfseiten auseinander weichen. Die Naslöcher sind getrennt und liegen vor den Augen. Ein Scheitelaugenloch fehlt. Die Quadrata reichen so weit nach vorn, daß das Unterkiefergelenk unter der Mitte der Augenhöhle liegt, und der Unterkiefer hat keine Kronfortsätze. Die Zähne können ganz fehlen oder sitzen in Gruben und sind nur auf den Kiefern zu finden. Es ist ein Schnauzenseitenloch im Schädel vorhanden. Die Pterygoide trennen die Palatine voneinander und stoßen an den Vomer. Die Binnennaslöcher liegen noch im oberen Munddach zwischen Vomer, Palatinum und Maxillare. Die Größe der Tiere schwankt zwischen der eines Sperlings bis zu einer Spannweite der Vorderglieder von 17 m. Sie konnten in 2 Familien (oder Unterordnungen) verteilt werden.

Familie Rhamphorhynchidae (= Unterordn. Rhamphorhynchoidea). Der Schwanz (Fig. 42) ist lang; der Mittelhandknochen des Flugfingers nicht halb so lang wie der zugehörige Unterarm. Das Außennasloch jeder Kopfseite ist von dem zugehörigen Schnauzenseitenloch durch eine Knochenbrücke völlig getrennt. Die Kiefer tragen Zähne. Die Tiere haben kurze Halsrippen und nur 4 Kreuzbeinwirbel. Der Atlas besteht aus mehreren Knochenstücken. Die Fundstätten der Gattungen liegen in der oberen Trias bis zum obersten Jura. — Sie haben ferner einige dm bis etwa 1 m Flugspannweite. Die Schwanzwirbelsäule hat etwa 40 Wirbel, ist dabei von verknöcherten Sehnen wie von einer Scheide umhüllt; und gut erhaltene Funde haben gezeigt, daß ihre Spitze von einer horizontal liegenden spatelartigen Hautflosse umhüllt war, die von zarten Fortsätzen der Wirbel gespannt erhalten wurde und als Flugsteuer diente. Die Zähne nehmen von vorn nach hinten an Größe ab und fehlen zuweilen den Kieferspitzen.

Gattung Rhamphorhynchus (Fig. 42): Die Vertreter haben übertrieben lange Schnauze. Die langen Zähne sind verschieden groß, ferner



Fig. 42. Rhamphorhynchus Gemmingi (Rhamphorhynchidae). Etwas schematisierte Skelettrekonstruktion, von der Bauchseite. Nach Stromer von Reichenbach.

dolchartig und fehlen vorn auf den Kiefern. Die Augenhöhle ist mächtig groß, dagegen sind die Außennasen- und die Schnauzenseitenlöcher klein. Die Tiere selbst stammen aus dem oberen Jura von Bayern und Württemberg. Arten R. longicaudatus und phyllurus, letztere ist mit Abdruck der Flughaut und des Schwanzsteuers erhalten.

Gattung Dimorphodon: Der Schädel ist noch größer im Verhältnis als bei der vorigen, aber sehr leicht. Die Augenhöhlen sind hier klein, die Außennaslöcher und das Schnauzenseitenloch dagegen groß. Art D. macronyx aus England.

Familie Pterodactylidae (als Unter-

ordn. Pterodactyloidea): Es sind Tiere mit kurzem Schwanz. Der Mittelhandknochen des Flugfingers ist bei ihnen wenigstens so lang, wie der zugehörige Unterarm. Das Außennasloch jeder Kopfseite fließt mit dem entsprechenden Schnauzenseitenloch mehr oder weniger zusammen; und zuweilen vereinigt sich damit auch noch die Augenhöhle. Die kleinen Zähne sitzen nur vorn in den Kiefern oder können fehlen. Der Atlas ist einheitlich gebaut. Diese Flederechsen lebten vom oberen Jura an bis zur oberen Kreide.

Gattung Pterodactylus (Vertreter der Unterfamilie Pterodactylinae): Die kleinen Augenhöhlen öffnen sich hier bereits in die Nasen-Schnauzenseitenlochspalte. Die Kiefer sind von der Spitze an mit Zähnen versehn. Es sind zahlreiche Arten davon aus Europa bekannt (so: longirostris, spectabilis und giganteus). Prachtvoll erhaltene Funde lieferte der lithographische Schiefer des oberen Jura von Bayern und Württemberg (bei Kehlheim, Solnhofen usw.).

Unterfamilie Ornithocheirinae (= Ornithocheiridae anderer Autoren): Die Augenhöhle (Fig. 43) ist durch eine Knochenbrücke noch völlig von der Nasen-Schnauzenlochspalte getrennt; die vorderen Rückenwirbel sind dagegen miteinander zu einer Einheit knöchern verwachsen. An dieser Wirbelmasse (Notarium) gelenkt dabei das Schulterblatt. Die Zähne können in den Kiefern vorhanden sein oder fehlen. Oberer Jura bis obere Kreide liefern die Vertreter.

Gattung Pteranodon. Die Schnauze und der Unterkiefer sind bis zum äußersten verlängert, scharf zugespitzt und beide zahnlos. Der Schädel läuft nach hinten in einen auffällig langen, hochaufragenden und dabei sehr dünnen Hinterhauptskamm aus. Von den 11 vorhandenen Rückenwirbeln sind die ersten 8 nicht nur in ihren Körpern sondern zugleich auch noch in ihren Dornfortsätzen zu einer einheitlichen Platte miteinander verwachsen (Supraneuralplatte. Die 10 Kreuzbeinwirbel sind gleichfalls fest miteinander verwachsen und auch ihre Dornfortsätze bilden eine gemeinsame Knochenplatte. Die Hintergliedmaßen sind verhältnismäßig klein. Die Spannweite der Vordergliedmaßen beträgt bis 7 m. Die obere Kreide in Kansas lieferte die Funde. Eine Art ist Pter. longiceps. — Gattung Ornithocheirus ist ähnlich Pteranodon, hat aber Bezahnung und reicht aus dem Wealden bis zur oberen Kreide Englands. — Gattung Nyctosaurus: Aehnlich dem vorigen, aber es sind nur 3 der vorderen Rückenwirbel mit einander mitsamt den Dornfortsätzen verwachsen, das Schulterblatt gelenkt deshalb auch nicht mit denselben; und am Schädel fehlt der Hinterhauptskamm. Die Vertreter stammen aus der oberen Kreide von Kansas.

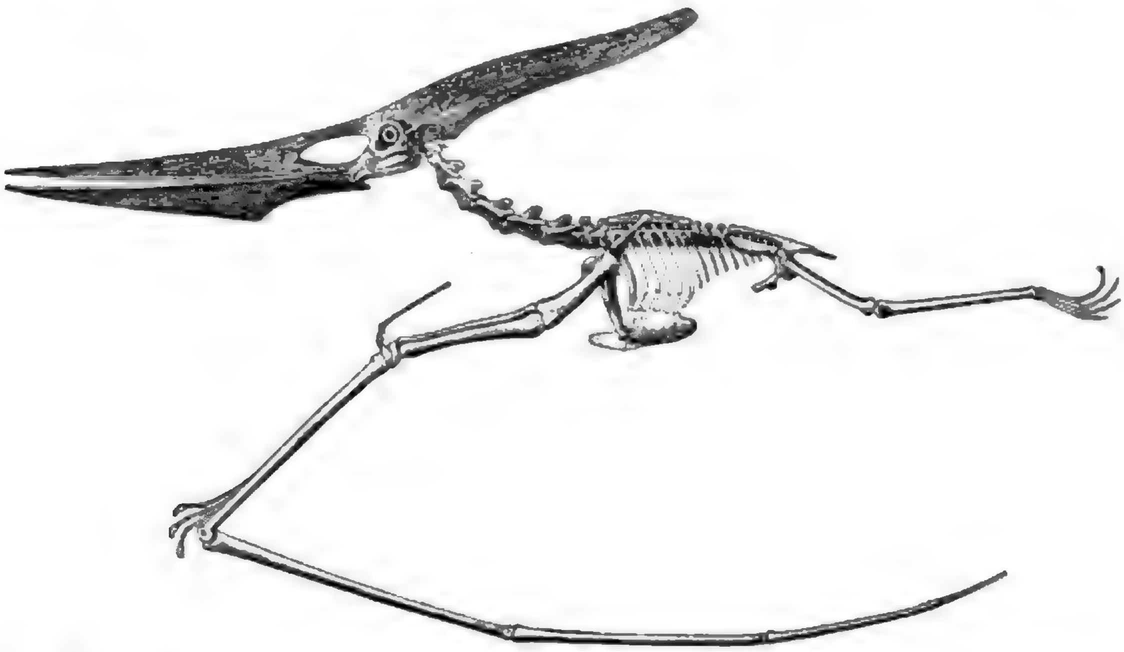


Fig. 43. Pteranodon Marsh. Auf Grund verschiedener Individuen restauriertes Skelett. Der Deutlichkeit der Darstellung halber sind die rechten Gliedmaßen fortgelassen und die linke Schwinge mehr gebogen, als es in Wirklichkeit der Fall wäre. Nach Eaton.

10. Ordnung Chelonia (Testudinata), Schildkröten (Fig. 34 und 35). Da die fossilen Schildkröten ohne Schwierigkeit in das System der zurzeit lebenden eingereiht werden können, sei wegen des Baus und der Anatomie auf den Artikel „Reptilien" dieses Handbuchs hingewiesen und als wesentliche Schildkrötencharaktere seien daher nur erwähnt: Der Rumpf ist in einen Hautknochenpanzer eingehüllt, der sich in Rücken- und Bauchschale sondert und den oft ein Hornpanzer noch überdeckt. Schulter- und Beckengürtel werden deshalb von diesem Panzer mit umschlossen während Verbreiterungen an den Rippen die Rückenschale selbst tragen

(Fig. 35) und mit ihr fest verwachsen sein könnten. Die Kiefer sind zahnlos und von Hornscheiden bedeckt. Die Naslöcher liegen an der Schnauzenspitze vereinigt und ganz nach vorn. Es sind nur die oberen Schläfenlöcher vorhanden und das übrige der Schläfengegend ist von Knochenplatten völlig überdeckt. Die Quadrate sind unbeweglich dem Schädel angefügt. Die Nasenbeine fehlen gewöhnlich wie auch Transversa. Das Parietale reicht bis zum Basisphenoid an der Schädelbasis. Ein unteres Munddach ist zumeist vorhanden (Fig. 34). Am Schultergürtel ist das Postcoracoid selbständig und das Intercoracoid mit dem Schulterblatt (als Processus praescapularis der Autoren) untrennbar vereinigt. Das Becken ist zuweilen oben und unten mit dem Hautknochenpanzer verwachsen. Die ältesten Schildkröten sind aus der Trias bekannt. Im oberen Jura werden sie häufig und kommen dann durch alle Zeiten hindurch reichlich bis zur Gegenwart vor.

Unterordnung Athecae (Lederschildkröten). Die Wirbel und Rippen sind nicht mit der Rückenschale verwachsen, sondern frei. Die Rücken- wie Bauchschale besteht aus zahlreichen kleinen viereckigen Platten und ist von einheitlicher weicher Haut bedeckt. Die Gliedmaßen sind krallenlose Ruderplatten. Der Hals ist in die Schale nicht zurückziehbar. — Die Fam. Dermochelyidae (Sphargidae) enthält die paläontologische Gatt. Psephophorus, die kräftigeren Schädel als Dermochelys besitzt und aus dem mittleren Eozän bis Pliozän Europas, sowie aus dem Miozän Nordamerikas nachgewiesen ist. — Fam. Protostegidae: Sie steht neben den Dermochelyden. Die Tiere haben Füße mit 3 und mehr Krallen, und sind bei ihnen in der Rückenschale außer dem Nuchale noch Wirbeldeckplatten und Randdeckplatten vorhanden. Obere Kreide und Oligozän in Nordamerika und Europa lieferten die Funde.

Die Gattung Protostega (Art: gigas) stammt aus Nordamerika, und Protosphargis aus Italien.

Unterordnung Tecophora, Hornplattenträger.

Abteilung Cryptodira: Die Brustwirbel und Rippen sind mit der Rückenschale verwachsen. Auch eine knöcherne Bauchschale ist vorhanden. Im Schädel reichen die Parietalen von oben bis an die Pterygoidea hinab oder sind mit ihnen durch eine Craniicolumella (Epipterygoid) verbunden. Der Hals biegt sich beim Rückgang unter die Schale in senkrechter Richtung s-förmig ein. Das Becken ist mit der Schale nicht verwachsen. Die fossilen Funde stammen aus dem oberen Jura bis zur Gegenwart. 1. Familie Emydidae: Sie reichen vom Eozän bis zur Gegenwart.

Die Gattung Emys konnte bisher in Europa bis in das Obereozän zurück verfolgt werden. Die fossile Gattung Ptychogaster lebte im Oligozän und Miozän in ziemlich weiter Verbreitung.

Die Familie Testudinidae hat Vertreter vom Eozän bis zur Gegenwart. Ihre älteste Gattung und zugleich die bisher älteste Landschildkröte Hadrianus stammt aus dem Eozän der Vereinigten Staaten.

Die Gattung Testudo tritt im Oligozän und Miozän bereits häufig auf. Auch ist sie sicher und ziemlich häufig aus dem Miozän und Pliozän Europas nachgewiesen.

Die bisher ersten Funde aus der Fam. Cheloniidae stammen aus der oberen Kreide.

Fossile Gattungen daraus sind: Allopeuron, mit langgestreckter schmaler Rückenschale und einem vorn ausgeschnittenen Nackenschild, aus der oberen Kreide Belgiens; Chelyopsis aus dem Oligozän von Belgien und Norddeutschland. Toxochelys, bei welcher Rücken- und Bauchschale schwach miteinander gelenken, der Vorderfuß noch wenigstens 2 Krallen hat und auch sonst noch nicht so vollständig als Ruderplatte ausgebildet ist wie bei Chelone. Die obere Kreide Nordamerikas lieferte die Vertreter.

Die Familie Thalassemydidae ist rein fossil und verbindet die heutigen See- und die Sumpfschildkröten Emydidae miteinander, denn sie hat noch nicht so ganz geschlossenen Schädelbau wie die Seeschildkröten; dagegen die Form der Knochenplatten der Bauchschale und die Gliedmaßenbeschaffenheit, deren 5 Zehen bekrallt waren, wie die Sumpfschildkröten. Die Tiere selbst waren Meeresbewohner vom Jura bis zur Kreide.

Gattung Eurysternum und Thalassemys.

Die Familie Chelydridae hat Vertreter vom oberen Jura bis zur Gegenwart.

Die Gattung Chelydra lebt zurzeit in Nord- und Zentralamerika und ist fossil im Miozän Europas und Pleistozän von Nordamerika gefunden. Aehnlich wie die gegenwärtig nur amerikanischen Fische Lepidosteus und Amia fossil im Tertiär Europas aufgedeckt wurden.

Die Familie Dermatemydidae kennt man von der oberen Kreide bis zur Gegenwart; dagegen haben die derzeitigen Fam. Cino- und Platysternidae bisher noch keine fossile Vertretung.

Abteilung Pleurodira: Rücken- und Bauchschale sind hier vollständig verknöchert und beide mit Hornschildern bedeckt. Die Füße haben Schwimmfähigkeit und 4 bis 5 Krallen. Der Hals wird durch Horizontalkrümmung in die Schale zurückgezogen. Das Becken verknöchert oben und unten mit den Schalen. Die Funde reichen von der Trias bis zur Gegenwart, und zwar in der Fam. Pelomedusidae von der oberen Kreide an.

Die Gattung Sternothaerus und Pelome-

dusa lieferten Fossile aus dem Mittelpliozän von Aegypten, die Gatt. Podocnemis aus dem Eozän von England.

Die Familie Chelyidae hat Vertreter vom Eozän an bis zur Gegenwart. — Von der rein fossilen Fam. Miolanidae sind bisher nur Bruchstücke bekannt. Das Becken ist mit der Rückenschale verwachsen. Der Schädel hat vollkommen überknöcherte Schläfen, ist mit hornartigen Knochenanhängen ausgestattet und den Schwanz umgibt eine massige Knochenhülle, deren Platten mächtige Buckel tragen.

Bei der einzigen Gattung Miolania ist der riesige Schädel am Hinterende von einer der Querhornspitzen zur anderen über ½ m breit.

Bei der rein fossilen Familie Plesiochelidae fehlen in der Bauchschale die Mesoplastra und nur das Pubis ist mit ihr verwachsen. Die Schläfen sind auch hier völlig überknöchert. Oberer Jura bis untere Kreide lieferten die Funde in Deutschland, Frankreich und der Schweiz.

Gattungen daraus sind: Plesiochelys und Hydropelta.

England; und scheint diese Gatt. darauf auch noch durch das ganze Miozän hindurch in Europa gelebt zu haben, ehe sie hier ausstarb. Ihre gegenwärtigen Vertreter leben dagegen in den gemäßigten und heißen Bezirken von Asien, Afrika und Nordamerika.

II. Ordnung Dinosauria (Groß-, Drachen- oder Gespensterechsen). Es sind (Fig. 44 bis 53 und 36) nur auf den Kiefern bezahnte Reptilien mit gesamtheitlich kleinem Kopf, mit ansehnlich langem Hals und Schwanz, mit seitlichen Außennaslöchern, 2 übereinander liegenden, voll umknöcherten Schläfenlöchern, mit nur mangelhaft ausgebildetem Munddach, mit gegabelten Rippen, ohne Schlüsselbeine und wahrscheinlich auch ohne Episternum. Es fehlt ihnen ferner fast stets das Scheitelaugenloch. Das Schulterblatt hat ansehnlichen Processus praecoracoideus (Trn.). Das Coracoid ist klein halbmondförmig und mit Foramen coracoideum versehen. Auch ist es einheitlich verknöchert (Trn.). Es sind 3 bis 10 Kreuzbeinwirbel vorhanden. Die 3 vorübergehend getrennten Hüftknochen stoßen in der Gleite für den Oberschenkel zusammen, die im Zentrum in großem Umfang durchbohrt ist. Am Oberschenkel liegen die Hüftgelenkgleite und die Querachse des Knies fast oder ganz parallel, wie sonst nur noch bei den Säugetieren und Vögeln; im Gegensatz zu diesen aber hat der Oberschenkel hier wie bei allen Reptilien einen großen Trochanter plantaris; ferner noch gar keinen Trochanter minor (= internus) und einen erst unbedeutend oder gar nicht ausgebildeten Trochanter externus (= Trochanter major) wie alle sonstigen Reptilien mit Ausnahme der Schildkröten

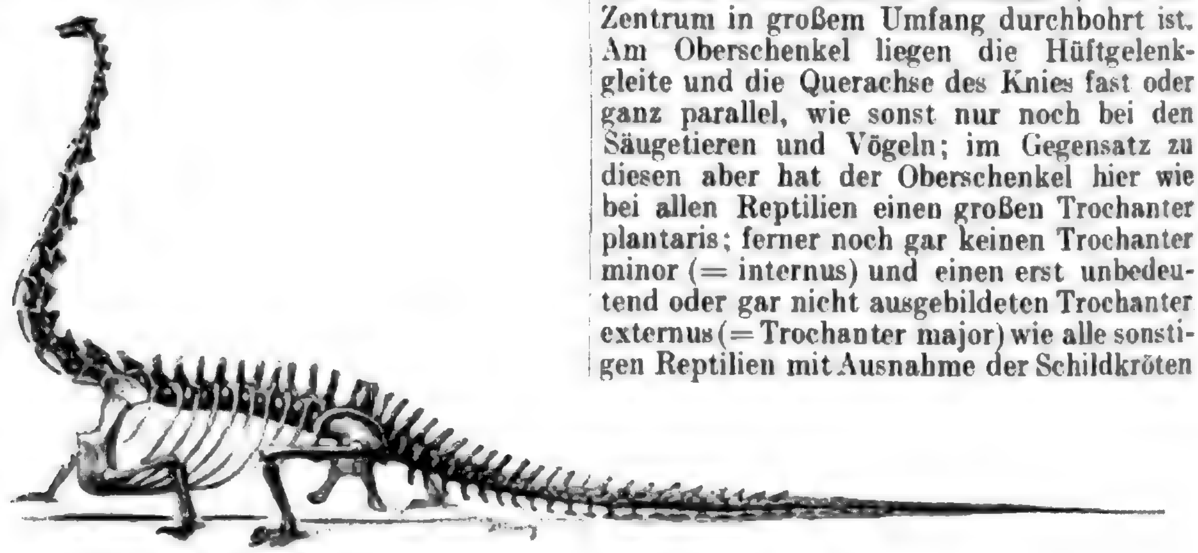


Fig. 44. Diplodocus carnegii. Skelettrekonstruktion. Original.

Unterordnung Trionychia, Schlangenhalsschildkröten. Rücken- und Bauchschale sind noch unvollständig verknöchert, haben knöcherne Runzeln auf der Oberfläche, sind durch Haut miteinander verbunden und ohne Hornbeschilderung. Die Rippenenden bleiben deshalb frei. Das Becken ist nicht mit den Schalen verwachsen. Die Zehen sind mit Schwimmhäuten versehen und 2 bis 3 an jedem Fuß haben Krallen. Die fossil ältesten Reste dieser Unterordnung stammen bisher aus der oberen Kreide von Nordamerika und zahlreiche Arten ferner aus allen Schichten des Tertiärs in Europa, Afrika, Ostindien und Nordamerika.

Zahlreiche gut erhaltene Funde aus der Gattung Trionyx kommen aus dem Obereozän von

(Trn.). Im Hinterfuß hat der Astragalus eine für die Ordnung eigenartige Form und gelenkt oben durch eine einfache schwach ausgehöhlte Gleite mit der Tibia; an der Außenseite wahrscheinlich ansehnlich mit der Fibula. Der Calcaneus ist ein ganz einfacher platter Knochenkern ohne Spur einer Hackenoder Sustentaculumanlage, und das ganze Sprunggelenk ist dabei fast oder ganz unbeweglich (Trn.). Es ist ferner im Fuß das für die Reptilien typische Intertarsalgelenk in übertriebener Ausbildung vorhanden (Trn.). Die Tiere lebten von der Trias an bis zur obersten Kreide und in allen Weltteilen, dann starben sie, ohne umgewandelte Nachkommen zu hinterlassen, aus.

Sonstige wichtige Charaktere sind: Das

Gehirn ist winzig klein und sehr viel kleiner gesamtheitlich als bei allen sonst bekannten Landwirbeltieren; dagegen sind die Kreuzbeinwirbel und der Wirbelkanal darin bei manchen ganz ungewöhnlich hoch (wie im Kreuzbein der Vögel) und steht das vor allem mit der starken Befestigung und Hinaufschiebung des Beckens am Kreuzbein in Beziehung (Trn.), und nicht, wie angenommen wird, mit einer Vergrößerung des Rückenmarks an dieser Stelle „wegen der Größe der Hintergliedmaßen". Die Zähne sind kegelförmig, zugespitzt, von innen und außen zusammengedrückt, vorn und hinten scharfkantig und sehr oft auch noch an den scharfen Rändern mit Zähnchen maxillare am Ethmoideum und den Nasbeinen zum Gleiten gebracht wird, noch wie bei der Giftschlangen, wo sie durch die Pterygoide und Transversa die Maxillaren am Schädel aufrichten und niederlegen, sondern es handelt sich hier in Wirklichkeit nur um am Quadratojugale oder oberen Jochbogen beweglich gewordene verlängerte Quadrata, die nur den Unterkiefer von hinten nach vorn und zurück unter der Schnauze verschieben können, so daß also mehrere voneinander unabhängige Formen der Epistylie zu unterscheiden sind (Trn.). Bei 2 von den 3 Unterordnungen der Dinosaurier endlich kommen Hilfsgelenkfortsätze (Hyposphen-Hypantrum-Gelenke) vor.


Harder u. Trn.

Fig. 45. Stegosaurus ungulatus.

oder Zacken versehen. Das Scheitelauge ist nur sehr selten vorhanden; dagegen hat die Schnauze 1 bis 3 Schnauzenseitenlöcher. Die beiden Kieferäste sind nicht knöchern verwachsen, sondern nur durch Knorpelsubstanz verbunden. Im unteren Munddach (Fig. 36) sind zumeist größere Lücken zu finden und stoßen daselbst häufig die Vomera mit den Pterygoiden zusammen und trennen die Palatina voneinander. Es sind Transversa und sogar Ektopterygoidea vorhanden. Die Rippen gelenken am oberen Wirbelbogen und am Wirbelkörper, die beide gewöhnlich durch Naht voneinander getrennt bleiben. Der Schwanz ist in der Regel mit langbedornten unteren Wirbelbogen versehn, die zwischen den Wirbeln gelenken. Ein Bauchknochenband kommt zuweilen vor. Bei vielen Arten sind die Wirbel und auch die großen Gliedmaßenknochen hohl, angeblich um das Gewicht zu erleichtern; wahrscheinlich (Trn.) vor allem aber zu energischer Blutbereitung im Knochenmark für die zumeist riesengroßen Körper. Bei manchen Arten sind ferner die Quadratbeine beweglich (Nopcza, Versluys); aber nicht etwa wie bei den Ratiten-Vögeln, wo dieselben vor allem durch die Quadratojugale die ganze Schnauze am Stirnbein mitbewegen, noch wie bei den Straußvögeln, wo durch sie nur das Prae-

Unterordnung Plateosauria (für Theropoda, denn die Füße haben gar nichts Säugetierartiges). Hauptcharaktere (Fig. 46, Schädel): Das Pubis ist einfach, ungegabelt, schlank und nach vorn gerichtet. Das Foramen pubo-ischiadicum ist unten offen. Die Beckenhälften aber bilden Pubis- sowie Ischiumsymphyse. Die Zähne reichen bis in die Spitze des Mundes. Der Schädel hat jederseits 1 bis 3 Schnauzenseitenlöcher und auch der Unterkiefer hat ein Außenseitenloch und ganz geringen oder keinen Kronfortsatz. Die 2-köpfigen Rippen gelenken am Hals mit dem Wirbelkörper und dem oberen Bogen; am Rumpf aber nur mit dem oberen Bogen. Am Hinterfuß verkümmert gewöhnlich der fünfte Zeh. Finger und Zehen haben scharfe Krallen und von innen nach außen 2, 3, 4, 5, 0 oder 1 Glieder. Ein Bauchband ist bei mehreren nachgewiesen. Der kräftigen scharfkantigen Zähne und Krallen wegen werden die Tiere selbst für Fleischfresser angesehn. Von der Trias an bis zur obersten Kreide Europas und Nordamerikas liegen ihre Fundstätten.

Es sind 6 Familien davon bekannt, die wichtigste ist: Familie Plateosauridae. Die Tiere sind mittelgroß oder noch größer; die Knochen hohl, die Wirbel bikonkav; Bauchbandspangen sind vorhanden, die Pubes nach

unten verbreitert und lang. Das Femur von S-Form ist länger als der Unterschenkel. Vorder- und Hinterfüße haben verkümmerten fünften Zeh. Die Tiere selbst stammen aus Trias und Jura. Sehr gut erhaltene Skelette sind zurzeit in Stuttgart in Bearbeitung und ansehnliche Funde auch bei Halberstadt gemacht.

Gattungen sind Plateosaurus, Gresslyosaurus, Zanclodon. Für die Plateosauriden, wie auch für die Fam. Anchisauridae, die kleinere, sehr ähnlich gestaltete Tiere mit bikonkaven oder biplanen Wirbel enthält, gilt folgende Biologie (Trn): Es ergibt ihre Anatomie, daß sie echten und reinen Reptilienbau in den Gliedmaßen haben, d. h. Oberarme und Oberschenkel in der Horizontalen bewegten, und daß sie normal vierfüßig gingen mit stark winklig gebogenen Ellbogen- und Kniegelenken auf plantigraden Füßen; daß sie vor allem aber mit den Füßen rudernde Tiere waren, die zwischen den weit auseinanderspreizbaren Vorder- und Hinterfußzehen Schwimmhäute besaßen; daß ihre Wirbelsäule in Hals und Rumpf im wesentlichen nur horizontale Schlängelbewegungen ausführen konnte, der Schwanz dagegen fast nur für Vertikalbewegungen befähigt war zur Erleichterung des Auf- und Absteigens im Wasser.

Die Familie Coeluridae hat kleine bis mittelgroße Vertreter; ihre Halswirbel sind konvex-konkav, die Rückenwirbel biplan. Der Oberschenkel ist kürzer als der Unterschenkel die Mittelfußknochen sind lang und dünn. Sie lebten von der Trias an bis zur obersten Kreide.

Gattung Tyrannosaurus: Der Schädel wurde in letzter Zeit von Osborn sehr eingehend beschrieben. Skelett bis 5 m lang. Art: T. rex, Nordamerika.

Die Familie Megalosauridae hat zumeist große Vertreter, mit vorn zahnlosen Kiefern; der Oberschenkel ist länger als der untere, Astragalus und Calcaneus sind verwachsen und ganz unbeweglich dem Unterschenkel angeschlossen; die Halswirbel sind konvex-konkav; die Rückenwirbel bikonkav. Der Unterkiefer ist vorn zahnlos, der Oberschenkel länger als der Unterschenkel.

Gattung Allosaurus: Der Schädel ist soeben von Osborn eingehend beschrieben und mit dem von Tyrannosaurus rex verglichen worden. Die Hintergliedmaßen sind wesentlich länger als die vorderen, und vorn und hinten sind 4 Zehen, von denen der Hinterfüße aber nur 3 gebrauchsfähig. Die untere Kreide Nordamerikas lieferte die Vertreter.

Die Biologie dieser 2 Familien ist noch zu erforschen, entgegen der bisher geltenden Ansicht, daß diese Tiere aufrecht laufende Landbewohner waren, ist wahrscheinlicher, daß auch sie Hintergliedmaßenschwimmer waren. Das Mißverhältnis zwischen den kleinen Vorder- und großen Hintergliedmaßen beweist dagegen nichts, denn bei Fröschen ist es noch viel größer und doch sind diese nicht „biped". — Familie Compsognathidae: Wirbel- und Gliedmaßenknochen sind hohl; die Halswirbel leicht konvex-konkav, die übrigen Wirbel biplan; der Hals ist lang, das Pubis ungegabelt und sehr schlank. Das Oberschenkelbein ist kürzer als der Unterschenkel, die Mittelfußknochen sind lang. Vorder- und Hinterfuß haben nur 3 gebrauchsfähige Zehen. Zehenglieder sind hinten 2, 3, 4, 5 (oder 4) u. 0. Die Hinterbeine sind doppelt so lang wie die vorderen.

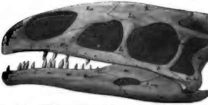


Fig. 46. Plateosaurus Reinigeri. Nach einer Originalzeichnung von E. Fraas 1911. Zähne z. T. ausgefallen. Pmx Prämaxillare, Mx Maxillare, N Außennasenloch, Nas Nasale, PrO Schnauzenseitenloch, La Lacrymale, Prfr Präfrontale, Fr Frontale, O Augenhöhle, J Jugale, Porb Postorbitale, Pa Parietale, ST oberes Schläfenloch, T unteres Schläfenloch, Sq Squamosum, Q Quadratum, QuJ Quadratojugale, Dent. Dentale, Cor Coronoideum (Kronfortsatzstück), S. ang Supraangulare, Ang Angulare, Art Articulare.

Gattung Compsognathus: Es ist der kleinste unter den bisher bekannt gewordenen Dinosauriern; in seiner Leibeshöhle liegt eine gefressene Eidechse (wie Nopcsa richtig angibt). Die Fundstätte ist der oberste Jura bei Kehlheim in Bayern. Weitere Untersuchungen ergaben (Trn): Die Mittelfußknochen sind nicht verwachsen, die 3 Fußwurzelknochen der zweiten Reihe sind selbständig gegeneinander, aber mit den gleichzähligen Mittelfußknochen verwachsen wie bei Lacerta. Die Charaktere der ersten Fußwurzelreihe sind völlig zerstört. Die Fibula ist so lang wie die Tibia. Die Hinterfüße zeigen sehr starke Einwärtskehrung der Sohle. Die Tiere dürften deshalb vielleicht sprungbegabte Krallenkletterer gewesen sein. Ein vorübergehend aufrechter Lauf, nicht aber Gang, nach Eidechsenart wie bei Chlamydosaurus und Basiliscus, nicht aber wie bei den Vögeln, ist zwar nicht nachweisbar, war aber wohl möglich.

Unterordnung Diplodocia (= Sauropoda). Dieser eingeklammerte Name ist unbrauchbar, da alle Dinosaurier ohne Ausnahme nur Reptilienbau in den Gliedmaßen haben. Der Schädel (Fig. 47 bis 50) ist gesamtheitlich klein (Fig. 44 und 45), und hat gewöhnlich nur ein einziges seitliches Schnauzenloch vor dem Augen, höchstens aber noch ein kleineres davor, das dann im Oberkieferbein liegt. Die Schädelhöhle ist außerordentlich klein und sehr viel kleiner als der Markkanal

in den Kreuzbeinwirbeln, hat aber völlig knöcherne Umkapslung. Die Naslöcher sind zumeist verwachsen und weit auf den Schädel hinaufgerückt, so daß sie dicht vor den Augen liegen. Die Zähne haben wohl Vorder- und Hinterkante, aber keine Zackenbildung an derselben, sondern sind lang, nur mäßig kräftig, spatel- und stiftförmig. Sie stehn dabei oft nur vorn in den Kiefern. Die Wirbel und das Becken sind nicht wesentlich von dem der vorigen Unterordnung verschieden (Fig. 44). Die Wirbel haben entweder von außen her starke Einbuchtungen in die Seiten oder sind hohlraumig. An den Halswirbeln ist der obere Bogen fest mit dem Wirbelkörper verwachsen. Die vorderen Wirbel bis in den Rumpf hinein sind konkav-konvex; die hinteren und die im Schwanz dagegen konvex-konkav oder beiderseits platt. Das Kreuzbein besitzt 3 bis 6 rippentragende Wirbel, von denen die mittleren sehr oft nicht nur in den Körpern, sondern auch bis in die Spitzen der Dornfortsätze hinauf verwachsen. Die Rippen der vorderen Halswirbel sind den Wirbelkörpern angewachsen und die Halsdornen sowie die des Rückens häufig quergegabelt. Auch finden sich an den Wirbeln Nebengelenkfortsätze (Hyposphen-Hypantrum-Gelenke). Der Schwanz hat an den unteren Wirbelbogen lange Dornfortsätze. In dem noch vorwiegend knorpligen Brustbein liegen 2 große Knochentafeln seitlich nebeneinander. Die Pubes sind ungegabelt und stoßen in der Körpermittellinie mit Knorpelfuge aneinander, wie auch die Ischia. Die Beinknochen sind nicht hohl. Die Hinterbeine sind entweder nicht wesentlich länger als die vorderen oder ebensolang und beide haben 5 Zehen, denen aber häufig Fingerglieder fehlen, und an den Vordergliedmaßen trägt nur der innerste Zeh eine Kralle; hinten dagegen die 3 innersten.

Es sind durchweg plumpe, schwerfällige, große bis riesige Tiere, von denen einzelne Arten bis an 30 m Länge erreichen. Dazu gehört auch das größte bisher bekannt gewordene Landwirbeltier mit Oberarmknochen von mehr als 2 m Länge. Die Tiere bewegten sich nach Reptilienart (Fig. 44) auf allen vieren und waren Küstenbewohner, die mit ihrem langen Hals vom Ufer aus und auf demselben kleine Beutetiere erjagten und sie unzerkaut verschluckten und die wohl auch in dem weichen Strandboden mit ihren Krallen Beutetiere wie auch Lagerstätten ausscharrten (Trn.). Die Annahme von Versluys, daß diese Beutetiere nur Fische waren, die von den im Wasser stehenden Tieren mit dem peitschenartig langen Schwanze erschlagen wurden, beruht auf unmöglichen Voraussetzungen und geht entschieden zu weit. (Siehe auch unter Gatt. Trachodon.)

Diese Diplodocia waren dereinst sehr weit über die Erde verbreitet. Sie sind schon häufig im unteren Jura von Nordamerika und Madagaskar, kommen dann auch im oberen Jura in England und Frankreich vor, sind später sehr häufig in der untersten Kreide Nordamerikas und wahrscheinlich auch Deutsch-Ostafrikas und weniger häufig darin in England; andere stammen ferner

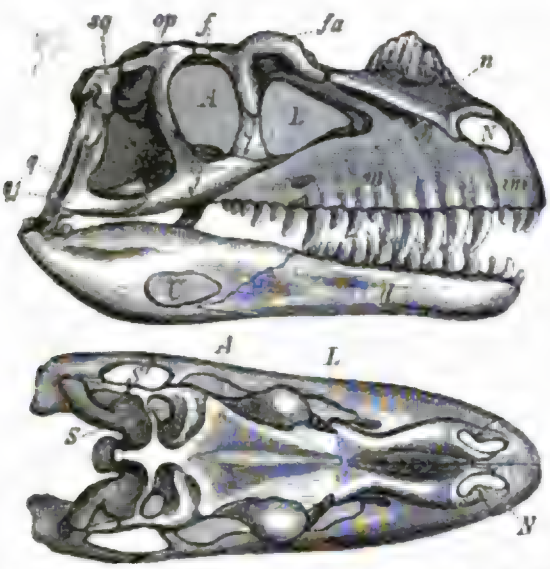


Fig. 47 und 48. Ceratosaurus nasicornis. Schädel von der Seite und oben.

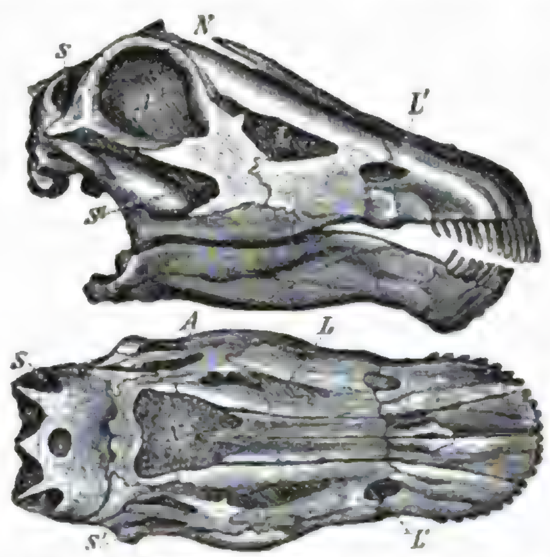


Fig. 49 und 50. Diplodocus longus. Schädel von der Seite und oben.

A Augenhöhle, f Frontale, fa Präfontale, im Zwischenkieferbein, j Jugale, l Lacrymale, L hinteres Schnauzenseitenloch, L′ vorderes Schnauzenseitenloch, m Maxillare, n Nasale, N Außennasloch, op Postoculare, q Quadratum, qj Quadratojugale, sq Squamosum, S unteres Schläfenloch, S′ oberes Schläfenloch, U Unterkieferseitenloch. Aus Steinmann, Einführung.

aus der Kreide von Aegypten, Madagaskar und Vorderindien und vielleicht Südfrankreich und noch aus der obersten Kreide Patagoniens; dann sterben sie, ohne veränderte Nachkommen hinterlassen zu haben, aus.

Man teilt sie in 4 Familien. Bei der Familie Cetiosauridae (Fig. 47 bis 48 Schädel) sind die oberen Dornfortsätze nicht gegabelt und sind die Hintergliedmaßen ebensolang wie die vorderen oder nur wenig länger. Die Vertreter lebten zur Jura- und Kreidezeit. Bei der Familie Atlantosauridae sind die hinteren Rückenwirbel bikonkav, und sämtliche Wirbelkörper bis ins vordere Schwanzende hinein umschließen große Hohlräume. Die Hals- und Rückenwirbel haben gegabelte obere Dornfortsätze, die Halsrippen lange Fortsätze. Die Vertreter stammen aus der unteren Kreide; der wichtigste ist Apatosaurus (= Brontosaurus): Es ist ein, in seinem ganzen Knochenbau bekanntes riesiges Tier von gegen 18 m Länge; hat winziges Gehirn, langen Hals und verhältnismäßig kurzen Leib und Schwanz. Es stammt aus der unteren Kreide Nordamerikas. Bei der Familie Morosauridae haben die Hals- und Rückenwirbel gegabelte obere Dornfortsätze, und nur diese Wirbelkörper sind hohlraumig, die des Kreuzbeins und Schwanzes nicht. Auch sind die Hintergliedmaßen wesentlich länger als die vorderen. Hauptvertreter der Familie sind die Gattung Morosaurus aus Nordamerika und England und Gigantosaurus, wohl der größte Dinosaurier, aus der oberen Kreide von Deutsch-Ostafrika. — Bei den Vertretern der Familie Diplodocidae (Fig. 44 Skelett; 49 und 50 Schädel) endlich sind die Zähne schwach, stiftförmig und auf den vorderen Abschnitt der Kiefer beschränkt. Jeder Zahn hat zahlreiche Ersatzzähne, die immer kleiner werdend, nebeneinander und einwärts von ihm im Kiefer liegen; die verwendbaren Zähne stehen dabei in Zahngruben. Die ganze Schnauze selbst ist entenschnabelartig breit; die Spitze des Unterkiefers ist schaufelartig nach unten niedergebogen. Es sind 2 Schnauzenseitenlöcher vorhanden und die langgestreckten Außennaslöcher liegen vereinigt hoch auf dem Schädel fast zwischen den Augen. Der lange Hals hat 15 Wirbel, dann folgen 10 Rückenwirbel, 5 Kreuzbeinwirbel und gegen 70 Schwanzwirbel, so daß dieser in ein peitschenartiges Endstück ausläuft. Die Tiere wurden bis 20 m lang. Sie stammen aus der unteren Kreide des westlichen Nordamerikas.

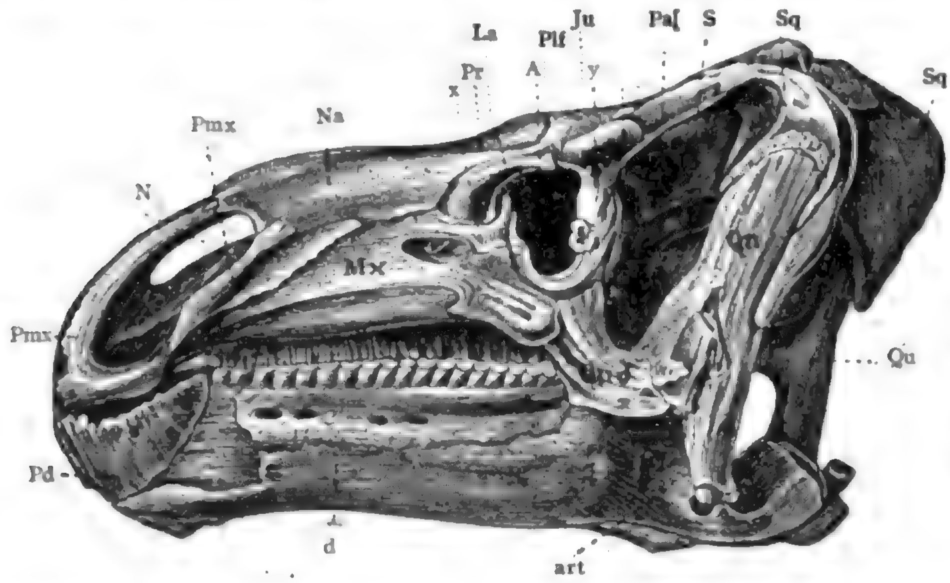


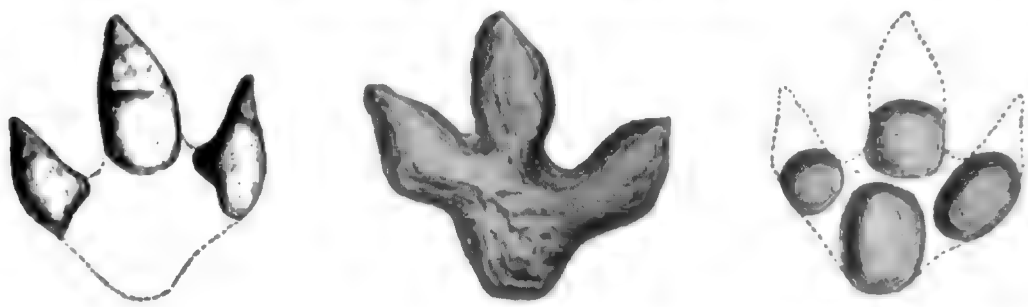
Fig. 51. Iguanodon Bernissartensis. Schädel. A Augenhöhle, N Außennasloch, S Schläfenloch, Pmx Prämaxillare, Mx Maxillare, Na Nasale, La Lacrimale, Plf Postfrontale, Pa Parietale, Sq Squamosum, Qu Quadratum, QuJ Quadrato Jugale, Pd Prädentale, d Dentale, art Articulare. Nach Dollo aus Zittel-Broili.

Unterordnung Praedentata (= Orthopoda). Dem Unterkiefer sitzt vorn um die Spitze herum ein überzähliger Knochen, das Prädentale, auf (Fig. 51). Die gebrauchsfertigen Zähne stehn in einer oder mehreren Reihen in den Kiefern. Die Zähne sind blattartig, von innen und außen stark zusammengedrückt und haben daher schneidenden, sowie zugleich auch noch gezackten Vorder- und Hinterrand. Die Außennaslöcher sind sehr groß und stehen ganz vorn und seitlich in der Schnauze. Die Wirbelkörper sind gewöhnlich nicht hohlraumig. Das Pubis ist gegabelt, d. h. es hat an seinem ganz nach hinten abgebogenen Körper (Postpubis der Paläontologen), einen stark nach vorn hervorragenden Seitenfortsatz (Processus lateralis der vergleichenden Anatomen, Präpubis der Paläontologen). Dieses Becken hat übrigens (Trn.) gar keine Verwandtschaft zu dem der Vögel und nur insofern Aehnlichkeit mit ihm, als bei den Vögeln die Baucheingeweide infolge der mächtigen Vergrößerung des Brustbeins auf den eigentlichen Standplatz des Beckens verschoben sind, während bei den Präden-

taten und der folgenden Unterordnung die Baucheingeweide in das Becken hineinverschoben waren und von dem Processus lateralis seitlich geschützt und vermittels der daran befestigten Bauchmuskeln getragen wurden. Die Gliedmaßenknochen sind hohl oder voll. Der Astragalus hat keinen aufsteigenden Fortsatz. Ein Hautskelett kann vorhanden sein oder fehlen. Die Fundstätten der Vertreter liegen von der oberen Trias an bis zur oberen Kreide. Es sind zumeist sehr große Tiere, von vier-, oder wie man vermutet zum Teil auch zweibeinigem Gang. Man stellt sie in 3 Familien. — Familie Iguanodontidae (= Ornithopodidae). Der Schädel (Fig. 51) ist zur Gesamtheit mittelgroß oder klein, ferner ungehörnt und sitzt annähernd rechtwinklig auf dem Hals; die Halswirbel sind zumeist konvex-konkav. Die Zähne haben außer Zackenrändern häufig noch eine stark vortretende Mittelrippe. Ein Schnauzenseitenloch ist vorhanden, hat aber gewöhnlich nur ganz geringe Größe. Die Wirbel sind voll, die Beinknochen hohl. Die Pubes sind stark gegabelt. Der Oberschenkel besitzt einen starken Trochanter plantaris (Trochanter quartus der Autoren). Die Hinterbeine sind wesentlich länger als die vorderen. Die Füße tragen entweder Krallen- oder abgerundete Zehenendglieder mit platter Sohlenfläche. Von den Hinterfußzehen sind nur 3 gebrauchsfähig. Die Tiere sind ohne Hautpanzer. Sie werden bisher für Pflanzenfresser und vorwiegend auf den Hinterbeinen laufende Wesen angesehen (s. auch darüber unter Gattung Iguanodon) und stammen aus der oberen Trias bis oberen Kreide.

Von der Gattung Camptosaurus sind mehrere Arten bekannt. Die Finger 1 bis 5 haben, 2, 3, 3, 3, 2 Glieder, und Zeh 1 bis 4: 2, 3, 4, 5. Der fünfte Zeh fehlt ganz, und der erste ist sehr kurz, so daß nur 3 wirklich gebrauchsfähig sind. Der Zwischenkiefer ist zahnlos. Die Kreuzbeinwirbel sind verwachsen. Astragalus und Calcaneus bleiben getrennt, und der Oberschenkel ist kürzer als der untere. Es sind große, bis 10 m lange Tiere aus Jura und Kreide von Nordamerika, Frankreich und England. Bei der Gattung Laosaurus sind die Vertreter kleiner, als die der vorigen Gattung. Jeder Unterkiefer trägt 5 zugespitzte Zähne in Zahngruben, die Schnauzenspitze ist aber zahnfrei. In jedem Unterkieferast stehen 10 Zähne in einer Reihe. Die Arten stammen aus der unteren Kreide des westlichen Nordamerika. — Gattung Iguanodon (zur Unterfamilie Iguanodontinae gehörig). Die Schnauze (Fig. 51) ist stark seitlich zusammengedrückt. Der zahnlose Zwischenkiefer sehr lang und hat scharfe Ränder, wie auch das zahnlose Prädentale. Auch die Nasenbeine sind sehr lang. Die Augenhöhlen sind höher als lang und kleiner als die Außennaslöcher und die unteren Schläfenlöcher, während die oberen Schläfenlöcher sehr klein sind. Der Unterkiefer hat einen hohen Processus coronoideus. Die Zähne im Maxillare und Unterkiefer stehen in mehreren Reihen eng aneinander, aber nur die der äußersten Reihe sind gebrauchsfähig und stehen in Gruben einer gemeinsamen Rinne hart an der Innenseite des Kieferrandes; die der Schnauze greifen dabei so von außen her über die des Unterkiefers hinab, daß beim Kauen sie selbst an ihrer Innen-, die des Unterkiefers dagegen an der Außenseite mächtige Reibflächen entwickeln. Die Tiere haben 10 Hals-, 18 Rücken-, 4 bis 6 miteinander verwachsene Kreuzbein- und 40 bis 50 Schwanzwirbel, von denen die letzteren mit mächtigen oberen und unteren Dornen versehen sind. Die Hals- und vorderen Rückenwirbel sind konvex-konkav, die des Rückenendes und Schwanzes biplan. Das Ileum läuft nach vorn und hinten in einen ansehnlich langen Fortsatz aus: Die sehr langen und nach unten gekrümmten Ischia stoßen aneinander an. Die Pubisknochen sind schlang aber nicht sehr lang. An den oberen Rücken- wie Schwanzwirbeldornen laufen zahlreiche verknöcherte Sehnen der Rückenmuskulatur entlang. Die Processus laterales der Pubisknochen sind sehr lang und breit. Der Oberschenkel hat einen ansehnlichen Trochanter plantaris. Die Fußwurzelknochen sind getrennt. Nur 3 Zehen sind gebrauchsfähig. und haben 3, 4 und 5 Glieder; der Zeh 5 fehlt ganz, und auch der Zeh 1 bis auf einen geringen Mittelfußrest. Die Vorderbeine sind sehr mächtig, aber wesentlich kürzer als die hinteren, die Finger 1 bis 5 haben 2, 3, 3, 3 und 4 Glieder. Der erste trägt ein mächtiges keilförmiges Endfingerglied, das mit mächtiger Hornscheide versehen war. Finger 2 und 4 haben spatenartige Endglieder und Flachnägel, der Finger 5 ist schwach und ohne Nagel. — Es sind 2 Arten beschrieben worden (Iguana mantelli und bernissartensis) von denen indes Gadow und Hooley annehmen, daß sie nur Männchen und Weibchen eine Art seien. Iguana mantelli erreichte dabei eine Länge von 5 bis 6 m, Iguana bernissartensis 18 m, doch sollen die Funde von Hooley diese Größenverschiedenheit überbrücken. Nachdem Bruchstücke aus dem unteren Grünsand und dem Purbeck von England bekannt gemacht waren, wurden 29 zumeist ganz, und bis auf die Zungenbeine erhaltene, erwachsene Vertreter der Art bernissartensis und 1 mantelli 1877 in Belgien in den Steinkohlengruben von Bernissart zwischen Mons und Tournai, nahe der französischen Grenze entdeckt. Die Knochen lagen zusammen in einer Gebirgsspalte, die mit toniger Wealdenkreide ausgefüllt war, ungefähr 300 m unter dem gegenwärtigen Meeresspiegel und sind zurzeit im naturhistorischen Museum in Brüssel aufgestellt. — Als Biologie wird für die Tiere bisher das folgende angegebenen: Sie lebten von Blättern (herbivor), gingen und liefen „lediglich" mit leicht nach vorn gebeugter Haltung zweibeinig aufrecht und hatten an den Vorderfüßen zu Dornen umgewandelte Daumen, mit welchen sie Gegner erstachen, wobei sie die fünften Finger zierlich seitlich abgespreizt hielten. Auch konnten die Hände zum Greifen benutzt werden. Beim Ausruhen saßen sie auf ihren großen Hinterbeinen und dem mächtigen Schwanz, der beim Gehen als Balanzierstange diente. Man stützt sich dabei vor allem auf dreizehige Fährten (Fig. 52) aus dem Wealdensandstein von England und Deutschland, welche zu Iguanodon gehören sollen. — Nach des Referenten Untersuchungen dagegen

gingen die Tiere vierfüßig als Sohlengänger — vielleicht mit Abrollung der Fußsohle vom Boden — und in typisch eidechsenartiger Haltung. Sie waren wenigstens omnivor, d. h. lebten — wenn überhaupt — jedenfalls nicht nur von Pflanzen, sondern vor allem von Kleintieren: Amphibien, Reptilien und Mollusken, etwa wie die sumpfbewohnenden Schweine und dreizehigen Nager der Unterfamilie Caviinae der derzeitigen Säugetiere, und zerrieben ihre Nahrung wie diese Nager durch Bewegungen des Unterkiefers an der Schnauze von vorn nach hinten und zurück, wie auch das Gebiß insofern nagetierartig ist als die beiden Zahnreihen der Schnauze und die des Unterkiefers ganz dicht aneinanderliegen und die Kauflächen der Unterkieferzähne schräg nach außen gerichtet sind, was auf ein Kauen aus den Backenräumen hinweist. Sie erlangten ihre Nahrung entweder durch Aufsammeln derselben beim Untergehen, oder aber vor allem, in dem sie auf Hinterbeinen und Schwanz gestützt mit den Vorderbeinen von innen nach außen den Boden aufscharten, ähnlich dem derzeitigen Orycteropus, und sie bewegten den Kopf dabei vorwiegend in der Senkrechten. Der Schwanz aber war als Stützorgan vorzüglich ausgebildet, da er fast gar nicht in sich beweglich, durch mächtige Muskulatur fest gegen den Boden gepreßt werden konnte. Auf den Schwanz und die Hinterbeine gestützt konnten die Tiere dann ferner auch zum Sichern gegen Gefahr den Vorderkörper aufrichten. Gegen Feinde wehrten sie sich durch Beißen mit den in Hornscheiden steckenden Kiefern. Jene dreizehigen Fährten aber (Fig. 52), die im Wealden Englands und Deutschlands gefunden sind und Iguanodon zugerechnet werden, gehören diesen Tieren nicht an, da Iguanodon stark abgerundete, plattsohlige Zehenendglieder besitzt und also auch solche Zehennägel oder Zehenkrallen hatte, jene Fährten aber von Tieren mit scharf zugespitzten Krallen abstammen. Auch waren die Fußsohlen und vor allem die Zehensohlen, von dem diese Fährten stammen, so wenig gegliedert, das sie sehr an die Füße dreizehiger Straußvögel erinnern, nicht aber an die von Reptilien, wobei es aber durchaus zweifelhaft bleiben mag, ob sie trotzdem nicht doch von anderen Reptilien oder gar anderen Dinosauriern als Iguanodon herstammen. — Eine ähnliche, oder aber nur in Nebensächlichem abgeänderte Biologie dürfte dann aber auch für die vorangehenden Vertreter dieser Familie anzunehmen sein. — Die Gattung Trachodon (= Hadrosaurus und Diclonius), zur Unterfam. Trachodontinae gehörig, lebte zur Zeit des Iguanodon und stammt aus der oberen Kreide Nordamerikas. Sie hat eine stark verlängerte und an der Spitze löffelartig verbreiterte Schnauze mit entsprechendem Unterkiefer, so daß der ganze Schädel, rein der Gestalt nach, stark an den der Löffelenten erinnert. Die Zwischenkiefer und das Prädentale sind dabei ganz zahnlos, während im Maxillare und Unterkiefer zahlreiche, kleine Zähne in mehreren Reihen dicht nebeneinander in einer gemeinsamen Rinne stehen, die nach dem Mundinnern hin offen ist. Es sind stets mehrere dieser Zahnreihen beim Kauen betätigt. — Die Art Trachodon mirabilis hat insgesamt 2000 Zähne. Das Skelett ist iguanodonartig und fällt darin vor allem die gitterartige Anordnung der verknöcherten Sehnen entlang den oberen Schwanzdornfortsätzen auf, die daselbst ein dreimaschiges System bilden. Die Hand hat aber nur 4 Finger, denn der erste fehlt ganz und auch der fünfte ist stark verkürzt. Nur an den 2 innersten Fingern (den wirklichen D_2 und $_3$) ferner sind abgerundet verbreiterte und flachrückige Endglieder, die Plattnägel getragen haben können. Der Unterarm ist dabei fast ebensolang wie der Oberarm, nur die Mittelhandknochen etwa halb so lang, während die Finger selbst kurz und plump erscheinen. Interessant ist auch, daß der Hautpanzerbau des Tieres festgestellt werden konnte, er besteht nämlich aus größeren Knochenplatten, um die herum kleinere gruppiert sind und von denen mehrere zu Feldern gesondert zusammentreten. Auf der Sohle der Vorderfüße sind dabei Gangschwielen nicht bemerkbar und Osborn ist sogar geneigt anzunehmen, daß auch gar keine Nägel an den Fingern vorhanden waren. Die Tiere wurden bisher für aufrecht gehend gehalten, Barnum Brown hält sie für Schwimmer, sie dürften aber beides nicht gewesen sein, sondern wahrscheinlich — wie viele Dinosaurier und vor allem die Diplodocia — vierfüßig gehende Sumpfbewohner, welche die plantigraden Gliedmaßen beim Gehen derartig überbeugt in den Sumpfboden hineinschoben, daß



a b c

Fig. 52. Fährtenabdrücke eines aufrechtschreitenden Tieres mit spitzen Krallen aus der untersten Kreide (Wälderzone) von Hastings in England und Rehburg bei Hannover. Angeblich von Iguanodon. a Fährte wahrscheinlich auf härterem Boden und bei Prüfung der Bodenfestigkeit (angeblich und vielleicht auch beim Laufen), b bei ruhigem Gang auf gut tragfähigem Boden, c wahrscheinlich beim Gang auf stark weichem Boden (angeblich bei Ruhestellung auf Hintergliedmaßen und Schwanz, der Schwanzabdruck aber fehlt).

die Hand- und Fußsohlen zuerst mit ihrer Wurzelgegend und den Mittelhand- und Fußknochen darin einsanken, die Fingerspitzen aber nach oben oder gar aus dem Sumpf herausschauten (wie ähnlich Fig. 52c als Fährte zeigt) worauf die Gliedmaßen den Sumpfboden derart vor sich her- und zusammenschoben, daß das Tier darin zuletzt genügend Tragfläche erlangte. Die Zehen und Finger waren also bei solchem Gang nach oben gerichtet und dadurch so stark vom Tragen des Körpers entlastet, daß sie deshalb im Endabschnitt ohne Schaden für das Tier verkümmern konnten. Eine auffällige Länge der Unterarme und Mittelhandknochen, wie sie auch Trachodon — wie schon erwähnt — besitzt, wurde aber dabei für das Tier besonders nützlich, weil dies das Betasten und Zusammenschieben des Sumpfbodens begünstigt.

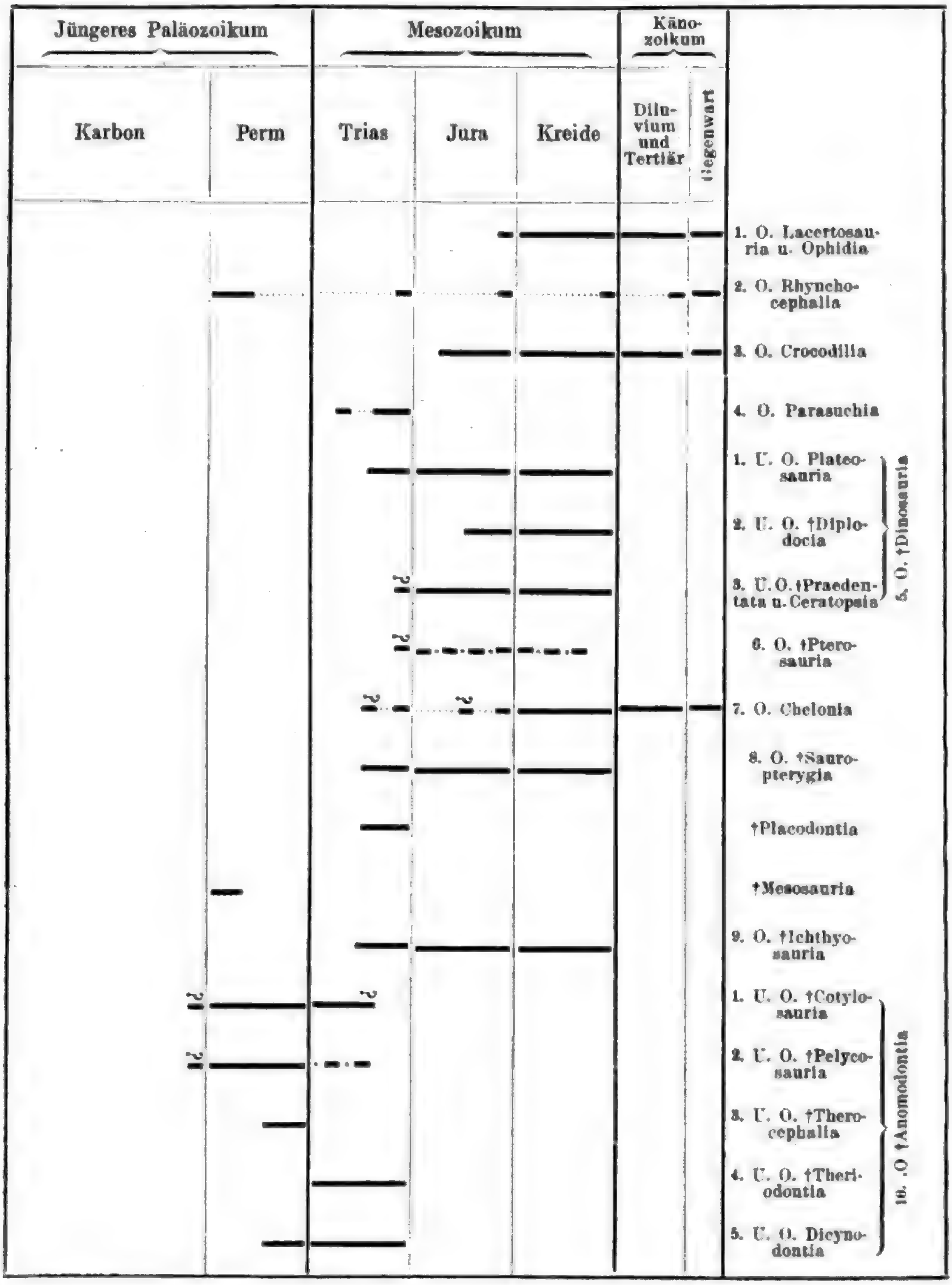
Familie Stegosauridae (Fig. 45). Der Schädel ist bemerkenswert klein. Der Zwischenkiefer und das Prädentale sind ohne Zähne. Es ist kein Schnauzenseitenloch vorhanden. Die Wirbel sind bikonkav oder biplan. Die Hinterbeine sind ansehnlich länger als die vorderen und beide tragen Plattnägel oder Plattkrallen, wie andere meinen, Hufe. Die Tiere sind drei- bis fünfzehige Sohlengänger, ohne wesentlich verlängerte Mittelfußknochen, und haben vorn 3 bis 4 und hinten nur 3 leistungsfähige Zehen. Die Rippen des Rumpfes sind zweigablig und werden nur durch die Querfortsätze der oberen Wirbelbogen getragen. Der Körper und besonders der Rücken werden durch Hautknochenplatten geschützt, welche nicht mit dem Binnenskelett zusammenhängen, also nur in der Haut befestigt waren und entweder einzeln liegen oder zu einheitlichen Schutzschilden zusammentreten könnten.

Von der Gattung Scelidosaurus (Art: harrisoni) ist ein nahezu vollständiges Skelett bekannt aus dem unteren Lias von England. Der Kopf ist sehr klein. Es sind 6 bis 7 Hals-, 4 Kreuzbein- und ungefähr 40 Schwanzwirbel vorhanden, sowie 4 Finger und Zehen mit 2, 3, 4, 5 Gliedern. Von dem fünften Zeh ist nur ein winziger Mittelfußrest vorhanden, und der erste Finger und Zeh sind verhältnismäßig klein, so daß die 4 Füße tatsächlich nur 3 leistungsfähige Zehen besitzen. Astragalus wie auch Calcaneus sind selbständig. Der Hautpanzer besteht vor allem aus 2 Reihen von gekielten Knochenplatten, die vom Nacken an über den Rücken hinzogen, und in eine einzige, auf der Schwanzmitte verlaufende Reihe übergingen. Daneben schützen noch kleinere Platten, in Reihen angeordnet, Körperseiten und Bauch. — Bei der Gattung Polacanthus, aus dem englischen Wealden ist der Rücken über der Lenden- und Kreuzbeingegend von einem festgefügten Panzer überdeckt, der von Knochen mit aufgerunzelter Oberfläche zusammengesetzt ist. — Von der Gattung Stegosaurus (Fig. 45) kennt man mehrere Arten aus der unteren Kreide von Nordamerika und England. Der Kopf ist bei allen niedrig, lang und auffällig klein, und das Gehirn so winzig, daß der mächtig vergrößerte Markkanal des Kreuzbeins es an Höhe um das zehnfache übertrifft. Die Zähne sind zahlreich und klein und stehen in nur einer gebrauchsfähigen Reihe. Die Halswirbel haben ansehnliche Rippen; die Rückenwirbel tragen sehr hoch aufsteigende obere Bogen und darauf mächtig hohe Dornfortsätze. Die Hinterbeine sind etwa doppelt so lang wie die vorderen. Die Ulna hat einen starken Ellenknorren. Die Kreuzbeinwirbel sind fest miteinander verwachsen. Der vor der Oberschenkelgleite liegende Teil des Ileum ist sehr verlängert. Der Pubiskörper und sein Processus lateralis bilden einen stumpfen Winkel miteinander; beide sind sehr kräftig entwickelt und der Pubiskörper liegt dem stark nach hinten gerichteten Ischium im ganzen Verlauf dicht an. Der Astragalus ist mit der Tibia verwachsen, der Calcaneus mit der Fibula. Es sind 5 Finger, aber nur 4 gebrauchsfähige, vorhanden und nur 3 kurze Zehen, die wie die Finger durch Plattnägel oder -krallen geschützt waren. Das Merkzeichen für das Tier aber ist ein gewaltiger Rückenkamm aus mächtigen senkrecht stehenden Knochenplatten, die entweder von der Haut oder Hornscheiden überdeckt waren, bereits im Nacken begannen und bis über die Mitte des Schwanzes in einer oder zwei Reihen auf der Mittellinie des Tieres emporragten. Am Schwanz wurden sie durch zwei Reihen nebeneinander stehender langer Stacheln abgelöst, die auch von Haut oder Hornscheiden überdeckt waren. Die Art Stegos. ungulatus aus der unteren Kreide Nordamerikas hat 9 m Länge.

Unterordnung Ceratopsia (Fig. 53). Der Schädel ist sehr groß und hat 2 nebeneinander stehende Hornzapfen auf den Stirnbeinen über den Augen und einen einzigen derartigen Zapfen auf dem Nasenbein, die sicher Hornscheiden trugen, wie bei den zurzeit lebenden 2- bis 4-hörnigen Chamaeleonen. Die Parietalia und Sqamosa dieses Schädels ferner sind in voller Berührung miteinander gewaltig nach hinten verlängert und bilden so einen riesigen Kragen, der die 4 ersten, miteinander verwachsenen Halswirbel von oben her dachartig überdeckt. Auf dem Rand dieses Kragens sitzen eine größere Anzahl kleiner Hautknochen, die wahrscheinlich ebenfalls mit Horn überkleidet waren. Der Schädel hat keine seitlichen Schnauzenöffnungen. So wie hier ferner der Unterkieferspitze ein Prädentale aufsitzt, so sitzt hier auch außerdem noch an der Schnauzenspitze den verwachsenen Zwischenkieferbeinen ein überzähliger Knochen, das Schnauzenbein (Rostrale), auf, und diese beiden überzähligen Knochen, wie auch der Zwischenkiefer sind ohne Zähne. Die sonst im Mund aber, am Maxillare und Dentale, vorhandenen Zähne stehen in Gruben und haben, sofern sie vorn stehen, nur eine Wurzel, die hinten stehenden dagegen sind stark querverbreitert und haben eine äußere und innere Wurzel, was von keinem Reptil sonst noch bekannt ist. Die Wirbel- und Beinknochen sind massiv. Der Markkanal des Kreuzbeins ist nicht erhöht. Die Pubisknochen haben keinen Processus lateralis, sind also einfach, dazu schräg nach

vorn gerichtet, und stoßen unten aneinander. Der Oberschenkel ist länger als der untere und hat einen Trochanter plantaris. Die Hinterbeine sind nur wenig länger als die vorderen, ferner dreizehig, während die vorderen 5 Finger tragen, von denen aber nur 4 tragfähig sind. Die Finger und Zehen haben, wie bei so vielen Dinosauriern, abgerundet verbreiterte und auf dem Rücken abgeplattete Endglieder, welche demnach Plattnägel oder Plattkrallen getragen haben. In der Rückenhaut der Tiere saßen einzelne Knochenplatten, die bei manchen Arten nach außen hin eine kegelförmige Mittelspitze, um-

Bisherige Fundstätten der paläontologischen Reptilien in zeitlicher Aufeinanderfolge. Nach Stromer von Reichenbachs entsprechender Tabelle.



ringt von einem Kranz kleiner Spitzen aufweisen. Mehrere Gattungen entstammen der oberen Kreide Nordamerikas.

Gattung Triceratops: Zu einer Skelettgröße von 8 m gehört hier ein Schädel von 2 m Länge, dessen mächtige Augenbrauhöcker nach vorn schräg aufwärts gerichtet sind, während das wesentlich kleinere Nasenhorn sehr schräg nach vorn aufsteigt. Der Unterkiefer hat einen großen Processus coronoideus und die spatelförmigen Zähne besitzen einen Kiel. Es sind 7 bis 8 Hals-, 14 Rücken-, 10 miteinander verwachsene Kreuzbeinwirbel und ein nur mäßig langer Schwanz vorhanden, und die Rippen haben durchweg 2 Köpfe. Von den Arten ist schon Tricerat. flabellatus sehr groß; Tricerat. prorsus aber am größten. — Andere Gattungen, von denen einige wohl eine noch stärkere Hautpanzerung als die vorgenannte trugen, zeichnen sich durch andere Hornbildung aus; so ist Diceratops ohne Horn auf der Nase, und Agathaumas hat kleine Stirn- und mächtiges Nasenhorn (Fig. 53).

Die Ceratopsia stimmen in der Pubisbildung mit den Diplodocia (Sauropoda) überein, durch den Besitz eines Hautpanzers und des Prädentale mit den Iguanodontia (Orthopoda), während sie von beiden Unterordnungen durch den Besitz des Rostrale, die Kragenbildung u. a. unterschieden sind.

Literatur. *K. v. Zittel, Grundzüge der Paläontologie. Abt. Reptilia. Neubearbeitet von F. Broili. München und Berlin 1911.* — ***E. Stromer v. Reichenbach****, Lehrbuch der Paläozoologie, Bd. 2 Wirbeltiere. Leipzig und*

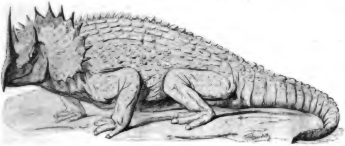


Fig. 53. Agathaumas sphenoceros (unter Mitbenutzung einer Figur von Charles Knight).

Bisherige Fundstätten von Dinosauriern in zeitlicher Aufeinanderfolge. Nach Broili.

	Trias	Lias	Dogger	Malm	Unt. Kreide	Ob. Kreide	Eocän
1. Plateosauria (= Theropoda)							
1. Plateosauridae	—		—				
2. Anchisauredae	—						
3. Labrosauridae					—		
4. Coeluridae	—			—	—	—	? —
5. Megalosauridae		—	—	—	—	—	? —
6. Compsognathidae	—			—	—	—	
2. Diplodocia (= Sauropoda)							
1. Cetiosauridae			—	—	—		
2. Atlantosauridae					—		
3. Morosauridae					—	—	? —
4. Diplodocidae					—		
3. Prädentata							
1. Ornithopodidae	—			—	—	—	
2. Stegosauridae		—	—	—	—	—	
4. Ceratopsia						—	

Berlin 1912. (Diese beiden ausgezeichneten Werke enthalten ausführlichen Bericht über die Literatur bis 1912, die nach Bedarf dort einzusehen ist, da es sich fast immer nur um sehr zahlreiche Einzelarbeiten über ein kleineres Gebiet handelt.) — Wichtig sind ferner: **H. Gadow,** Amphibia and Reptilia. London 1901. Ausgezeichnet durch seine biologischen Kapitel und seine phylogenetischen Schlußfolgerungen. — **A. J. Woodward,** Vertebrate Paläontologie. Cambridge 1898. — **G. Steinmann,** Einführung in die Zoologie, 1907, Geologische Grundlagen der Abstammungslehre. Leipzig 1908. Zur Abstammung der Säuger. Zeitschrift für induktive Abstammungs- und Vererbungslehre, 1909, H. 2, S. 65 bis 90 und Ueber die Ursache der Asymmetrie der Wale. Annat. Anzeiger 1912, Bd. **41**, S. 45 bis 54. Mit sehr interessanten Versuchen, die Wirbeltiere in ausgedehntem Maß polyphyletisch auseinander abzuleiten. — **Hutchinson,** Creatures of other Days 1894 und Extinct Monsters 1893; mit guten Rekonstruktionsversuchen. — **O. P. Hay,** Bibliographie and Catalogue of the fossil Vertebrata of North America. U. S. Geol. Surv. Bull. 179, 1902. — **R. Lydekker,** Catalogue of the fossil Reptilia and Amphibia in the British Museum, Part I bis IV. London 1888 bis 1890. — **F. Broili,** Permische Stegocephalen und Reptilien aus Texas. Palaeontographica, Bd. **51**, 1904. — **H. F. Osborn,** The Reptilian Subclasses Diapsida and Synapsida. Mem. Americ. Mus. Nat. Hist., Vol. **1**, 1903. — **H. Fuchs,** Betrachtungen über die Schläfengegend am Schädel der Quadrupeda. Anat. Anzeiger, Bd. **35**, 1909. — **R. Broom,** On the origin of the Mammal-like Reptiles. Proc. Zool. Soc. London 1907, II. — Aus der in letzter Zeit erschienenen Literatur seien dann noch erwähnt: **N. van der Hoepen,** Bijdragen tot de Kennis der Reptielen van de Karooformatie. Annals (Mededelingen) Transvaal. Mus., Vol. **IV**, 1913, No. 1, S. 1 bis 46, Taf. I bis VIII. — **L. Lambe,** The manus in a specimen of Trachodon from the Edmonton formation of Alberta. The Ottowa Naturalist, Vol. **XXVII**, 1913, S. 21 bis 25, mit 3 Taf. — **B. Brown,** The Manus in the Family Trachodontidae. Bull. Amer. Mus. Nat. Hist., 1912, Vol. **31**, S. 105 bis 7. — **H. F. Osborn,** Crania of Tyrannosaurus and Allosaurus und Integument of the Iguanodont Dinosaur Trachodon. Memoirs Mus. Nat. Hist., New Series, Vol. **I**, 1912, S. 1 bis 54. — **Charles W. Gilmore,** A new Dinosaur from the Lange formation of Wyoming. Smithsonian miscellaneous collections, Vol. **61**, No. 5, 1913. — **A. Delage,** Sur les traces de grands Quadrupèdes dans le Permien inférieur de l'Hérault. C. R. Acad. Sc. Paris, T. 154, p. 1547—48, 1912. — **S. W. Williston,** Primitive Reptiles. A. Review. Journ. Morphol., Vol. **23**, p. 637 bis 664, 1 Fig., 1912. — **M. Finney,** The limbs of Lysorophus, ibid., p. 664 bis 666. — **S. W. Williston,** American Permian Vertebrates. Chicag. Univ. Press, 8⁰, 144 S., 38 Taf., 32 Fig. — **H. Fuchs,** Das Munddach der Amnioten. Anat. Anzeiger, Bd. **38**, S. 609 bis 637, 1911. — **F. v. Huene,** Ueber Erythrosuchus, der Vertreter der neuen Reptilienord. Pelycosauria. Geol. pal. Abh., N. F., Bd. **10**, p. 1 bis 60, 11 Taf., 60 Fig. (Die Einteilung der Reptilien in Synapsida und Diapsida ist nicht aufrecht zu halten.) — **J. Hewitt,** Note on the Relationship of the Maxilla of Vipers to that of Colubridae. Ann. Transvaal Mus., Vol. **3**, p. 93 bis 95, 1911. — **B. W. Kunkel,** Zur Entwickelungsgeschichte und vergleichenden Morphologie des Schildkrötenschädels. Anat. Anzeiger, **39**, S. 354 bis 364, 3 Fig., 1911. — **O. Bender,** Ueber Herkunft und Entwickelung der Columella auris bei Testudo graeca. Anat. Anzeiger, Bd. **40**, S. 161 bis 177, 6 Fig., 1911. (Die Ohrkapsel und Columella auris werden getrennt angelegt und bleiben getrennt.) — **E. Fraas,** Embryonaler Ichthyosaurus mit Hautbekleidung. Jahresh. Verein Vaterländ. Nat. Württemb., Jahrg. 67, 1911, S. 480 bis 487, 5 Fig. — **v. Huene,** Beiträge zur Kenntnis des Ceratopsidenschädels. Neues Jahrb. Min. Geol. Pal., 1911, Bd. **2**, S. 146 bis 162, 10 Fig. — **E. Stromer v. Reichenbach,** Bemerkungen zur Rekonstruktion eines Flugsaurierskeletts. Monatsber. Deutsch. Geol. Gesellsch., 1911, S. 85 bis 91, 1 Taf. — **J. Versluys,** Streptostylie bei Dinosauriern nebst Bemerkungen über die Verwandtschaft der Vögel und Dinosaurier. Zool. Jahrb., Bd. **30**, Anat., S. 175 bis 260, 1 Taf., 25 Fig. (Die Schädelbewegung ist bei beiden ähnlich.) — **Derselbe,** Waren die sauropoden Dinosaurier Pflanzenfresser? Zool. Jahrb., Bd. **29**, Syst. Abt., S. 425 bis 450, 1 Taf., 10 Fig., 1909. — **G. Tornier,** Wie war der Diplodocus carnegii wirklich gebaut? Sitzber. Gesell. nat. Fr., 1909, S. 193 bis 209. — **Derselbe,** War der Diplodocus elefantenfüßig? Sitzber. Gesell. nat. Freunde Berlin, 1909, S. 536 bis 557. — **Derselbe,** Ueber und gegen neue Diplodocusarbeiten. Monatsber. Deutsch. Geol. Gesellsch., Bd. **62**, 1910, S. 536 bis 576. — **O. Abel,** Rekonstruktion des Diplodocus. Abh. d. k. k. Zool.-Botan. Gesellsch. Wien, 1910, Bd. **V**, H. 3. — **W. J. Holland,** A. Review of some Recent criticisms of the Restoration of Sauropod Dinosaurs etc. Amer. Natural., Vol. **44**, p. 259 bis 283, 1 pl., 20 Fig. — **R. L. Lull,** Stegosaurus ungulatus Marsh, recently mounted at the Peabody Museum of Yale University. Amer. Journ. Sc., Vol. **30**, p. 361 bis 377, 1 pl., 10 Fig., 1910. — **Derselbe,** The Armour of Stegosaurus. Americ. Journ. Sc., Vol. **30**, 1910. — **R. Broom,** A revision of the Reptiles of Karroo. Ann. South Afric. Mus., Vol. **7**, Pt. 6, S. 361 bis 366, 1913. — **Derselbe,** On the Gorgonopsia, a suborder of the mammal-like Reptiles. Proc. zool. Soc. London, 1913, Pt. 2, S. 225 bis 230. — **Derselbe,** On a new Mesosaurian Reptile Noteosaurus africanus. Ann. South Afr. Mus., Vol. **7**, Pt. 6, S. 358 bis 360, 1913. — **P. J. du Toit,** Ueber Brooms Ableitung der Säugetiere von den theromorphen Reptilien. Naturwiss. Wochenschrift, 1911, N. 27, S. 417 bis 423. — **R. Broom,** On the Origin of Mammals. British and S. A. Associations Report, Vol. **III**, London 1907 und The Reptiles of the Karroo Formation, in „The Geology of Cape Colony, 2nd Edition, London 1909". — **Ch. W. Anders,** A descriptive Catol. of the Marine Reptiles of the Oxford Clay. 1913.

Gustav Tornier.

Resorption.

In Laven die Auflösung fremder hineingeratener Gesteinsbruchstücke oder die Wiederauflösung von in einer früheren Periode der Gesteinserstarrung ausgeschiedenen Kristallen. Vgl. den Artikel „Mineralbildung auf eruptivem Wege“.

Resorption.

1. Allgemeines. 2. Die Resorption im Verdauungskanal: a) Die physikalisch-chemischen Grundlagen. b) Anteil der verschiedenen Abschnitte des Verdauungskanales an der Resorption. c) Resorption der einzelnen Stoffe und die weiteren Schicksale derselben. α) Resorption der Kohlenhydrate. β) Resorption des Fettes. γ) Resorption des Eiweißes. d) Physiologische Vorgänge bei der Resorption. e) Spezieller Mechanismus der Darmresorption. 3. Die parenterale Resorption: a) Die interstitielle Resorption. b) Resorption aus serösen Höhlen.

1. Allgemeines. Unter Resorption verstehen wir die Aufnahme von Stoffen in das Innere der Zellen. Bei einzelligen Lebewesen gibt es nur eine Resorption aus der umgebenden Außenwelt, während bei den mehrzelligen Lebewesen außerdem noch Resorption aus den Räumen im Innern des Organismus vorkommt.

Der Aufnahme von Stoffen aus der Außenwelt dient bei allen mehrzelligen Tieren, insbesondere bei den Wirbeltieren und dem Menschen, fast ausschließlich ein eigenes Organ, der Verdauungskanal. Nur der Sauerstoff der Luft tritt auf dem Wege der Lunge in den Körper und dieser Vorgang gehört daher nicht in die Lehre von der Resorption, sondern von der Atmung. Die Bedeutung der Haut und der nach außen gerichteten Schleimhäute ist, unter natürlichen Bedingungen, meist eine so geringe, daß sie ganz zurücktritt. Ihren verschiedenen Aufgaben nach wird die Resorption in die beiden Hauptarten unterschieden: 1. Die Resorption im Verdauungskanal oder enterale Resorption. 2. Die Parenterale Resorption, die Resorption aus den serösen Höhlen und aus der Gewebsflüssigkeit der verschiedensten Organe.

2. Die Resorption im Verdauungskanal. Die in den Verdauungskanal aufgenommene Nahrung wird dort resorbiert, um auf diese Weise dem Organismus zugute zu kommen. Nur ein Teil der in der Nahrung befindlichen Stoffe können unverändert aufgenommen werden, der größere Teil unterliegt erst der chemischen Verarbeitung durch einen Vorgang, der als Verdauung bezeichnet wird. Die Verdauung ist eine Vorbedingung für die Resorptionsfähigkeit, daneben erfüllt sie noch die andere Aufgabe, die Stoffe in eine dem Organismus zuträgliche Weise umzuwandeln.

Auf dem Wege der Ernährung gelangen die drei organischen Stoffklassen der Eiweiße, der Fette und der Kohlehydrate, eine große Reihe von Salzen und Wasser in den Verdauungskanal. Die Lehre von der Resorption hat für jeden einzelnen dieser Stoffe über den Ort und die Wege der Resorption und über die Kräfte, welche dabei im Spiel sind und die spezielle Form, in welchen die Körper resorbiert werden, Aufschluß zu geben.

2a) Die physikalisch-chemischen Grundlagen des Mechanismus der Resorption. Das wesentlichste für die wissenschaftliche Erforschung ist die Aufklärung über den Mechanismus der Resorption, d. h. über die Kräfte und die Bedingungen, durch welche der Uebertritt von Stoffen aus der Umgebung in die Zellen geregelt wird. Ganz allgemein betrachtet handelt es sich bei der Resorption um einen Vorgang, bei welchem durch eine Membran hindurch, welche zwei Lösungen trennt, ein Flüssigkeits- und Stoffaustausch stattfindet. Für einen solchen Vorgang, wenn er rein physikalisch-chemischer Natur ist, gelten eine Reihe von Regeln.

Der einfachste Fall ist derjenige, daß die Membran Wasser und alle gelösten Bestandteile hindurchläßt. Besteht auf beiden Seiten der Membran ein hydrostatischer Druckunterschied, so geht Lösung vom Orte höheren zum Orte niederen Druckes, so lange das Druckgefälle als Triebkraft vorhanden ist; dieser Vorgang ist eine Filtration. Wenn die Lösungen auf beiden Seiten der Membran eine verschiedene Zusammensetzung haben, so findet auf dem Wege der Diffusion ein Ausgleich statt, bis die Konzentrationen beiderseits gleich sind, wobei die Stoffe bei einem gegebenen Konzentrationsunterschied vom Orte höherer zum Orte niederer Konzentration infolge osmotischen Druckunterschiedes wandern. Die Länge der Zeit, welche hierzu erforderlich ist, hängt von der Diffusionsgeschwindigkeit der gelösten Stoffe, von der Temperatur und von den Eigenschaften der Membran ab. Denn wenn auch die Membran, der Voraussetzung nach, alle Stoffe hindurchläßt, so kann sie doch den einzelnen Stoffen einen verschieden großen Widerstand entgegensetzen, entweder aus mechanischen Gründen oder weil die Substanz der Membran selbst ein Lösungsmittel ist, in welchem die einzelnen Stoffe der Lösung verschieden stark löslich sind.

Wenn die Beschaffenheit der Membran

derart ist, daß sie nicht für alle Bestandteile der Lösung durchlässig ist, werden die Verhältnisse verwickelter. Die Membran kann nur für Wasser durchlässig sein; sie wird dann als halbdurchlässig bezeichnet. Die gelösten Bestandteile veranlassen dann bei verschiedener Konzentration auf beiden Seiten der Membran infolge ihres osmotischen Druckes eine Wanderung von Wasser vom Orte niederen zum Orte höheren osmotischen Druckes. Die Osmose tendiert dahin den osmotischen Druckunterschied aufzuheben und sie hört auf, wenn entweder der osmotische Druck beiderseits gleich ist oder hydrostatische Druckkräfte dem osmotischen Druck das Gleichgewicht halten. Bei einer Vielheit von aufgelösten Stoffen wirkt jeder einzelne nach Maßgabe seines Einzeldruckes.

Weit häufiger ist der Fall, daß außer Wasser noch andere Bestandteile der Lösung die Membran passieren können, während sie nur für einzelne Stoffe impermeabel ist oder wenigstens so viel schlechter permeabel, daß ein ganz erheblicher zeitlicher Unterschied sich ausbildet. So besitzen gerade die aus tierischen und pflanzlichen Organismen gewonnenen Membranen die Eigenschaft, Stoffe, die als Kolloide bezeichnet werden, entweder gar nicht oder nur in sehr mäßigem Umfang durchzulassen. Es werden daher durch solche Membranen die übrigen gelösten Stoffe und das Wasser sich nach den Regeln der Diffusion und Filtration ausgleichen, jedoch die zurückbleibenden kolloiden Stoffe eben wegen ihrer Impermeabilität einen osmotischen Wasserstrom hervorrufen, falls sie in Lösung einen osmotischen Druck besitzen, so daß ein Druckunterschied erhalten wird. Von den kolloiden Stoffen, die im Organismus vorkommen, besitzen die meisten einen zwar sehr niedrigen, aber doch in Betracht kommenden osmotischen Druck. Der osmotische Wasserstrom stört das zustande gekommene Gleichgewicht, denn nun ist auf der Seite des nicht die Membran passierenden Kolloides eine Verdünnung der übrigen Bestandteile zustande gekommen, ein neues Diffusionsgefälle kann in Wirksamkeit treten. Wenn die Undurchgängigkeit eine nur relative ist, d. h. die einen Stoffe leicht und rasch, die anderen schwer und langsam durchtreten, so liegen im Anfange die Verhältnisse fast genau so, wie eben beschrieben wurde und erst später verläuft alles wie bei einfacher Diffusion. Membranen können nicht allein undurchlässig für Kolloide, wie z. B. Eiweißkörper, zusammengesetzte Fette und Kohlehydrate sein, sondern eine selektive Permeabilität für einfachere Stoffe, insbesondere für einzelne Ionen, besitzen. Wenn aber ein Ion in die Membran eintreten kann, das andere, entgegengesetzt geladene aber nicht, so tritt notwendigerweise eine Trennung der beiden entgegengesetzten Elektrizitäten ein. Dadurch wird die Membran zum Sitze einer elektromotorischen Kraft, welche in den Vorgang der Diffusion modifizierend einzugreifen vermag.

Die besonderen physikalisch-chemischen Eigenschaften der Membran, durch welche sie von Einfluß auf die Qualität und Quantität des hindurchtretenden wird, beruhen in ihrer Struktur, ihrem physikalisch-chemischen Aufbau. Das wichtigste strukturelle Moment ist die Porengröße der Membran. Je größer der herrschenden Annahme nach das Molekül einer Substanz ist, um so größer müssen auch die Poren der Membran sein, um bei geringen Druckunterschiedenen hindurchzufiltrieren. Es lassen sich künstliche Membranen verschiedener Dichte herstellen und mit Hilfe hoher Drucke Mischungen von Kolloiden verschiedener Teilchengröße gewissermaßen voneinander sieben. Demnach besteht für den Umfang des Hindurchtretens von Stoffen durch eine Membran ein gewisses Verhältnis zwischen Dichte derselben und Druckdifferenz. Des weiteren kann die bloße Struktur die Richtung bestimmen, in welcher Stoffe durch die Membran wandern. Es konnten künstliche aus Pergamentchromateiweiß und Pergamentkolloiden bestehende Membranen hergestellt werden, bei denen die Durchlässigkeit in zwei entgegengesetzten Richtungen eine verschiedene war. In noch ausgesprochener Weise ist das bei abgetöteten tierischen Membranen der Fall, woraus hervorgeht, daß ein strukturelles Moment und nicht ein an das Lebendigsein gebundener Vorgang die Einseitigkeit der Richtung bedingen kann.

Die chemische Konstitution der Membran greift vor allem dadurch in den Vorgang des Passierens ein, daß der oder die Stoffe, aus welchen die Membran besteht, als Lösungsmittel zu betrachten sind. Sobald dieses Lösungsmittel verschieden von demjenigen außen ist, haben gelöste Stoffe Gelegenheit, sich zwischen zwei Lösungsmitteln zu verteilen. Nach dem Verteilungssatz verteilt sich ein Stoff zwischen zwei Lösungsmitteln nach seiner Löslichkeit in den beiden. Diese Verteilung führt zu einem ganz anderen Endresultat als die Diffusion oder die Osmose, indem die letztere schließlich gleiche Konzentrationen beziehentlich gleiche osmotische Drucke auf beiden Seiten herstellen, während erstere, wenn die Löslichkeit sehr verschieden ist, eine ganz andere Konzentration der aneinander grenzenden Systeme zeitigt. Es kann dazu kommen, daß praktisch gesprochen der gelöste Stoff sich vollständig von dem einen System in das andere begeben hat. Das System mit

großem Lösungsvermögen übt, wie man sich bildlich ausdrücken kann, ein Selektionsvermögen aus. Das Selektionsvermögen ist ein Phänomen, welches als hervorstechendes Merkmal der Zelltätigkeit ein viel diskutiertes Problem ist: der Verteilungssatz eröffnet die Möglichkeit, das, was als Ausfluß eines Selektionsvermögens erscheint, durch ein physikalisch-chemisches Prinzip zu erklären.

Im Organismus ist das eine Lösungsmittel Wasser, denn die Säfte des Körpers sind wässerige Lösungen und auch in den Darmkanal werden zumeist wässerige Lösungen eingeführt. In den Zellen kommen vor allen eiweißartige und fettartige Stoffe vor. Die fettartigen oder lipoiden Stoffe in der Zelle insbesondere sind es, welche als ein zweites Lösungsmittel in Betracht zu ziehen sind. Wenn es sich um Stoffe handelt, die sowohl in Fett beziehentlich Lipoiden (wozu Körper wie die Lecithine, die Phosphatide, die Cholesterine und andere gehören) löslich sind, so kommt es auf den Wert des Verhältnisses

$$\frac{\text{Löslichkeit in Lipoiden}}{\text{Löslichkeit in Wasser}}$$

an, wie viel sich in dem einen und wie viel sich in dem anderen System endgültig ansammelt. Sehr zahlreiche Versuche mit chemisch zum Teil sehr verschiedenen Stoffen haben ergeben, daß je mehr sich der Teilungskoeffizient zugunsten der Lipoide verschiebt, um so besser vermag die betreffende Substanz in die Zelle einzudringen. Da es aber einzelne Ausnahmen von dieser Regel gibt und gerade einige der wichtigsten, nachweislich in die Zelle eintretenden Stoffe in den Lipoiden unlöslich oder schwerer löslich wie in Wasser sind, hat die Anwendbarkeit dieses unzweifelhaft sehr fruchtbaren Prinzips seine Grenzen.

Die Aneinanderlagerung zweier physikalisch und chemisch verschiedener Systeme oder Phasen gibt Veranlassung zum Auftreten zweier weiterer Kräfte, die in einen Austauschvorgang, wie es die Resorption ist, eingreifen können. Jede einzelne Flüssigkeit hat ihre charakteristische Oberflächenspannung, worunter die Oberflächenenergie pro Einheit der Oberfläche verstanden wird. Haben zwei aneinander grenzende Flüssigkeiten eine verschiedene Oberflächenspannung, so kann die Differenz der Oberflächenspannungen eine Triebkraft darstellen, welche eine Osmose vom Ort niederer zum Orte höherer Oberflächenspannung bewirkt. Die zweite Kraft ist diejenige, welche dem Vorgang der Adsorption (siehe den Artikel „Adsorption") zugrunde liegt. Betrachtet man die von Flüssigkeit umspülten Körperzellen als eine feste Phase oder ein von der erstgenannten verschiedene zweite flüssig-kolloide Phase, so tritt Adsorption von Substanz aus der flüssigen in die flüssig-kolloide Phase ein. Das Gleichgewicht, welches bei Abschluß der ziemlich rasch eintretenden Adsorption eintritt, ist ein Endzustand sehr verschiedener Konzentration der beiden Phasen und weicht von den Endzuständen sowohl bei Filtration und Diffusion wie bei echten chemischen Reaktionen wesentlich ab.

Insoweit die bei der Resorption im Organismus tatsächlich beobachteten Vorgänge sich als zu den beschriebenen Erscheinungen zugehörig erweisen, werden sie als physikalisch-chemisch erklärbar angesehen. Wo dies nicht gelingt, muß entweder die Beteiligung noch unerforschter physikalisch-chemischer Kräfte oder das Walten physiologischer Triebkräfte, d. h. solcher, die an den im Leben vorhandenen Gesamtzustand der Zelle gebunden sind, angenommen werden.

2b) Anteil der verschiedenen Abschnitte des Verdauungskanales an der Resorption. Der Magen vermag im Unterschied von den beiden anderen Abschnitten des Verdauungskanales, den Dünndarm und Dickdarm, kein Wasser zu resorbieren, denn aus einer Fistel hinter dem Ausgange des Magens passieren die aufgenommenen Wasser oder Salzlösungsmengen entweder unverändert oder nur verändert durch das Hinzutreten von abgesondertem Magensafte. Salze werden allerdings etwas resorbiert. Außerordentlich gering ist das Resorptionsvermögen der Schleimhaut des Magens für Eiweiß und die durch die Magenverdauung entstehenden Abbauprodukte des Eiweißes; für letztere ist es etwas größer. Die Angaben über den Umfang der Resorption von Eiweißabbauprodukten sind schwankend. Auch die Fette werden bei den höheren Tieren vom Magen praktisch nicht resorbiert, hingegen die leicht wasserlöslichen Zuckerarten wie Rohrzucker und Traubenzucker.

Gifte, namentlich in Alkohol gelöst, werden vom Magen leicht resorbiert.

Es ist der Dünndarm, welcher den hauptsächlichsten Ort der Darmresorption darstellt. Durch die große Länge des Darmes besitzt die denselben auskleidende Schleimhaut eine große Resorptionsfläche. Diese wird durch die besondere Einrichtung der Darmzotten noch vergrößert. Die Darmzotten sind langgestreckte Ausstülpungen der Dünndarmschleimhaut, demgemäß bekleidet vom Zylinderepithel des Dünndarms. Unterhalb dieses Zellraumes liegt ein mit einem dichten Netz von kapillaren Blutgefäßen erfülltes, netzförmig angeordnetes Bindegewebe. In demselben befinden sich außerdem noch

zahlreiche Leukocyten oder weiße Blutkörperchen und vereinzelte glatte Muskelfasern. In der Mitte der Zotte liegt ein ventraler Lymphraum, welcher mit den tieferen Lymphgefäßen in der Schleimhaut des Darmes kommuniziert. Diese Lymphgefäße münden schließlich in den Brustlymphgang, dem Hauptlymphstamm des Körpers. Die Zotten erscheinen ihrer Struktur nach als Apparate, geeignet als Pumpwerkzeuge zu dienen.

Die einzelnen Abschnitte des Dünndarmes erweisen sich hinsichtlich des Umfanges der Resorption, trotzdem Unterschiede im Aufbau wesentlicher Art nicht konstatierbar sind, als durchaus ungleichwertig. Am klarsten geht das aus dem Verhalten der Fette hervor; nur der untere Abschnitt resorbiert Seifen, nicht aber der obere Darmabschnitt; emulgierte Neutralfette werden von allen Teilen des Dünndarms resorbiert, reichlicher vom unteren Dünndarm. Stärke und Rohrzucker werden etwas stärker in den oberen Darmpartien resorbiert. Auch hinsichtlich der Eiweißabbauprodukte liegen Unterschiede vor, die aber deshalb nicht eindeutig sind, weil der Grad der Zerlegung des Eiweißes in den einzelnen Darmabschnitten variiert. Der Dünndarm im ganzen ist der Ort wo Eiweiß, Fett, Kohlehydrate, Salze und Wasser zur Resorption gelangen.

Der Dickdarm vermag Wasser, wässerige Lösungen, Kohlehydrate, sowie in nicht unbeträchtlichem Umfange Eiweißprodukte zu resorbieren, Fette nur sehr mäßig.

Wenngleich der Darm der Ort der Resorption ist, so ist zur Vollständigkeit der normalen Resorption nicht allein erforderlich, daß in ihm selbst alle Bedingungen zur Resorption möglichst günstig seien — wozu Unversehrtheit desselben, normale Körpertemperatur und guter Kreislauf gehören — sondern es sind noch Einflüsse nötig, die von anderen Organen ausgehen. Am bemerkenswertesten ist der Einfluß, welchen die Pankreasdrüse ausübt. Durch Entfernung derselben wird die Darmresorption von Eiweiß und Fett ganz erheblich verschlechtert. Diese Tatsache wird durch die Vorstellung erklärt, daß die Pankreasdrüse ein inneres Sekret an den Organismus abgibt, welches unter anderen die Funktion besitzt, die Darmzellen zur Resorption befähigter zu machen.

Die experimentellen Grundlagen über den Ort und die Größe der Resorption werden auf zwei verschiedene Weisen erworben. Entweder werden Darmfisteln angelegt, beziehentlich gewisse Darmabschnitte abgebunden und bestimmt, wieviel vom eingebrachten Material verschwunden, wieviel zurückgeblieben ist oder es werden einzelne eingebrachte Stoffe auf ihren anderweitigen Wegen im Organismus und in dessen Ausscheidungen verfolgt.

2c) Resorption der einzelnen Stoffe und die weiteren Schicksale derselben. *α*) Resorption der Kohlehydrate. In welcher Form auch die Kohlehydrate genossen werden, zur Resorption gelangen dieselben als wasserlösliche Monosaccharide, da im Darmkanal kräftige Fermente vorhanden sind (siehe den Artikel „Verdauung") um höhere Zuckerarten wie Stärke, Rohrzucker und Milchzucker hierin umzuwandeln. Daß die Spaltung für die Resorption notwendig ist, geht daraus hervor, daß Tiere, deren Darm das Milchzucker spaltende Ferment Laktase nicht enthält, Milchzucker auch nicht zu resorbieren vermögen. Andererseits vermag der Darm größere Mengen von Monosachariden, wie sie durch die Verdauung geliefert werden, durch die Resorption nicht zu bewältigen, vielmehr wird das Epithel geschädigt und funktionsuntüchtig gemacht. Daraus geht hervor, daß die Zufuhr von Kohlehydraten in einer zunächst nicht resorbierbaren Form und der allmähliche Abbau durch die Verdauungselemente biologisch von tiefer Bedeutung ist. Dieselbe Ueberlegung gilt für andere organische Nahrungsstoffe.

Den Stoffen, welche vom Epithel der Darmschleimhaut resorbiert worden sind, stehen zwei Wege zur Verfügung, auf denen sie eventuell im Organismus weiter gelangen könnten. Entweder sie werden von den oben beschriebenen Blutkapillaren oder den Lymphbahnen aufgenommen. Das Experiment unterscheidet dahin, daß sie direkt auf dem Wege des Blutstroms weitergeführt werden, denn selbst nach einer sehr reichlichen Ernährung mit Kohlehydraten findet sich keine Vermehrung des Zuckergehaltes in der Lymphe des die Eingeweidelymphe fördernden Brustlymphganges.

Der von den Kapillaren der Darmschleimhaut aufgenommene Zucker wird, da diese Kapillaren dem Pfortaderkreislauf angehören, zur Leber transportiert und dort zum größten Teile in Form eines polymerisierten, kolloiden Zuckers, Glykogen oder tierische Stärke, aufgestapelt. Solange nicht übermäßige Mengen von Zucker eingenommen werden, fungiert die Leber durch ihre Glykogen bildende Funktion als ein ausgezeichneter Regulator; erst wenn sie versagt, übersteigt der Zuckergehalt des Blutes die engen ihm angewiesenen Grenzen, und es tritt als Anzeichen hierfür Zucker im Harn auf. Neben der Aufstapelung des Glykogens in der Leber existiert noch eine weitere Ursache für den praktisch unveränderten Gehalt des Blutes an Zucker trotz Resorption sehr

großer Mengen von Kohlehydraten (z. B. 500 g pro Tag). Die Geschwindigkeit des Blutstromes in den Eingeweiden und dementsprechend die in der Zeiteinheit passierende Blutmenge ist so groß, daß der über mehrere Stunden sich verteilende Zuwachs keinen für die Analyse merklichen Unterschied in der während einer kurzen Zeitperiode zur Analyse aufgesammelten Blutprobe zu schaffen vermag.

β) Resorption des Fettes. Die in der Nahrung aufgenommenen Fette sind Neutralfette, Glyzerinester der Fettsäuren Palmitin, Stearin und Oleinsäure. Ehe sie zur Resorption gelangen, unterliegen sie der Einwirkung von den fettspaltenden Fermenten des Magens und Pankreassaftes, welche letzterer durch die in der Galle enthaltenden Gallensäuren verstärkt wird. Auch der Darmsaft enthält ein fettspaltendes Ferment. Es entstehen Fettsäuren und Glycerin. Die Fettsäuren verbinden sich mit dem Alkali des Darmsaftes zu Seifen. Die Fettsäuren und zum Teil die Seifen sind an und für sich wasserunlöslich; die Galle besitzt jedoch die Eigenschaft in sehr hohem Maße die genannten Stoffe, insbesondere bei Gegenwart von Oelsäuren, zu lösen. Die Möglichkeit, daß alles aufgenommene Fett vor der Resorption gespalten und in lösliche Form übergeführt wird, läßt sich nicht von der Hand weisen.

Der Weg, den das zur Resorption vorbereitete Fett einschlägt, ist ein zum größten Teil anderer als derjenige der Kohlenhydrate. Der bloße Anblick der Lymphgefäße des Darmes und der aus einer Fistel des Brustlymphganges fließenden Lymphe ist nach einer Fettnahrung wegen der milchig trüben Färbung sehr bezeichnend. Die Analyse der aufgefangenen Lymphe ergibt, daß 60% des resorbierten Fettes den Lymphweg einschlagen, den übrigen 40% ist — abgesehen von demjenigen, kleinen überhaupt nicht resorbierten Teil — der Blutweg vorbehalten.

Eigenartig ist das weitere Schicksal des Fettes vom Moment an, wo es in das resorbierende Epithel eintritt. Wir sehen, daß alles oder ein großer Teil des Fettes gespalten wird. Das im Brustlymphgang befindliche resorbierte Material ist wiederum Neutralfett; demnach muß eine Synthese aus Glycerin und Fettsäure, unter Zerlegung der Seifen, stattgefunden haben. Mit aller Sicherheit ist der Beweis für eine solche Synthese dadurch erbracht worden, daß auch nach Fütterung mit reinen Fettsäuren im Brustlymphgang sich Neutralfett vorfindet, zu dessen Bildung notwendigerweise Glycerin vom Organismus geliefert werden mußte. Diese Synthese spielt sich innerhalb der kleinen Dimension der Darmepithelzelle ab, welche von dem resorbierten Material durchlaufen wird, ehe es in die Zotte gelangt. Denn die mikroskopische Untersuchung des Darmepithels während der Fettresorption lehrt, daß im obersten Teile der Zelle, demjenigen, welcher dem Darmlumen zugekehrt ist, kein mit Fett färbenden Mitteln nachweisbares Fett vorhanden ist, während in den basalen, der Zotte zugekehrten Teilen der Zelle große, sich charakteristisch färbende Fetttröpfchen und Tropfen auftreten. Es läßt sich geradezu ein allmähliches Anwachsen der Fetttropfen beobachten. Hieraus wird geschlossen, daß das Fett als lösliche Seife in die Zelle eintritt und dort zu Neutralfett umgewandelt wird, worauf ein Konfluieren zu Fetttropfen sich ereignet. Der eigentümliche Unterschied in dem mikroskopischen Verhalten des Fettes innerhalb der Darmepithelzelle spricht sehr zugunsten der Ansicht, daß Fett ausschließlich in gespaltener und gelöster Form resorbiert wird im Gegensatz zu der lange vertretenen Auffassung, daß Fett zum Teil in emulgierter Form resorbiert werde. Bei Gegenwart von etwas Fettsäure vermag der alkalische Pankreassaft unter Mitwirkung der Galle äußerst feine Emulsionen von Neutralfett herzustellen. Solange das große Lösungsvermögen der Galle für Fettsäuren nicht bekannt war, mußte dem Emulsionsvorgang eine große Bedeutung als Bedingung der Fettresorption zugemessen werden und auch jetzt wird noch die Ansicht vertreten, daß ein Teil des Fettes als emulgiertes Neutralfett resorbiert werde. Experimentell ist allerdings festgestellt worden, daß bei Eingabe einer sehr feinen Emulsion aus Paraffin und Neutralfett ausschließlich das letztere resorbiert wurde, eine Tatsache, die sich am leichtesten daraus erklärt, daß nur das Neutralfett im Darm spaltbar ist.

Die Frage, auf welche Weise das in der Darmepithelzelle synthetisierte Neutralfett von dort in die Darmzotte gelangt, ist noch nicht eindeutig beantwortbar. Im Chylus (vgl. den Artikel „Lymphe") findet sich das Fett in Form von sehr viel kleineren Tröpfchen als in der Darmepithelzelle, also muß eine gewisse Umwandlung stattgefunden haben. Nach der einen Auffassung wird das Fett in einer jedenfalls nicht mehr tropfenförmigen Art von der Epithelzelle basalwärts ausgeschieden, nach der anderen Auffassung wird es von den in der Zotte reichlich vorhandenen Leukocyten aufgenommen und durch dieselben nach dem zentralen Zottenraum transportiert. Die Unsicherheit rührt daher, daß bis jetzt ausschließlich histologische Methoden zur Prüfung des Vorganges benutzt werden konnten.

Die Tatsache, daß keine Fettsäuren resorbiert werden, vielmehr stets eine Synthese zu Neutralfett eintritt, wird biologisch durch die Erfahrungen verständlich, welche gemacht wurden, als man Fettsäuren oder Seifen intravenös injizierte. Sie erwiesen sich aus Gründen, auf welche hier nicht einzugehen ist, als starke Gifte für den Organismus. Die Synthese ist ein biologisch zweckmäßiger Vorgang, um den Organismus vor den Schädigungen durch die Spaltprodukte zu schützen, wie die vorausgehende Spaltung ein für die Resorption in die erste Zellage des Organismus erforderlicher Prozeß ist. Hinsichtlich des letzteren existiert noch die Frage, ob alles Fett vor der Resorption gespalten werden müsse. Mit der oben dargelegten Möglichkeit, daß die Bedingungen erfüllt sind, um alles Fett, was für gewöhnlich aufgenommen wird, zu spalten, ist die Frage nicht erledigt, namentlich deshalb nicht, weil gewisse Teile der Darmschleimhaut eigentümlicherweise Seifen nicht resorbieren.

γ) Resorption des Eiweißes. Das mit der Nahrung aufgenommene Eiweiß unterliegt der Spaltung durch die Verdauungssäfte (vgl. den Artikel „Verdauung"). Durch die kombinierte Wirkung von Pepsin, Trypsin und Erepsin entstehen aus dem Eiweiß eine große Reihe von Mono- und Diaminosäuren. Außerhalb des Körpers gelingt es, das Eiweiß vollständig in diese keinerlei Eiweißcharakter mehr besitzende, kristallinische Bausteine aufzuspalten; im Darm sind mit Sicherheit gleichfalls fast alle bekannten Bausteine des Eiweißes aufgefunden worden. Unbeschadet der noch zu erörternden Frage, ob nicht ein gewisser Teil ohne vorherige tiefergehende Spaltung resorbiert werde, ist die Verfolgung des Schicksals der Spaltprodukte von der quantitativen Seite aus jedenfalls das wesentlichste.

Das Schicksal des aufgenommenen Eiweißes läßt sich am leichtesten dadurch verfolgen, daß der das Eiweiß im Unterschied von den Fetten und Kohlenhydraten charakterisierende Stickstoff bestimmt wird. Die Resorption selbst sehr großer Mengen verläuft sehr rasch; nach 8 Stunden wird beim Menschen und den fleischfressenden Säugetieren etwa 60% des aufgenommenen Stickstoffs im Harn wiedergefunden und in 24 Stunden hat — unter normalen Bedingungen — praktisch der ganze aufgenommene Stickstoff im Harn den Organismus verlassen. Die Resorption selbst ist natürlich viel rascher verlaufen, wie die Untersuchung einzelner Darmabschnitte nach gewissen Zeiten lehrt. Die vorher genannten Zahlen repräsentieren neben der Resorptionszeit noch die umfangreichere Zeit, in denen der Stickstoff den gesamten Cyklus seiner Aufgaben im Körper leistet.

Der größte Teil des Eiweißes gelangt nach seiner Resorption durch die Epithelzellen auf dem Blutwege in den Organismus. Das geht daraus hervor, daß erstens nach Abbindung des großen Brustlymphganges der Stickstoff in unveränderter Weise im Harn ausgeschieden wird, also mit Umgehung des Lymphweges vorher resorbiert worden sein mußte und daß zweitens bei direkter Bestimmung des Stickstoffgehaltes der Brustlymphe während der Resorption einer reichlichen Eiweißmenge zwar eine gewisse Erhöhung der Stickstoffmenge nachweisbar ist, aber doch in so bescheidenen Grenzen, daß dieselbe bei Betrachtung der Resorption vernachlässigt werden kann.

Während der Weg des Eiweißes bei der Resorption klar zutage liegt, ist das anders bei der Frage nach der Form, in welchen sich die einzelnen Phasen der Eiweißresorption vollziehen. Im Vordergrunde des Interesses steht die bemerkenswerte Tatsache, daß unter normalen Bedingungen keines von den zahlreichen stickstoffhaltigen Spaltungsprodukten des Eiweißes im Blute nach einer noch so reichhaltigen Eiweißnahrung vorgefunden wird, auch nicht im Blute einer Vene, welche direkt aus dem Darm ihr Blut bezieht. Diejenigen Spaltungsprodukte des Eiweißes, welche dem Eiweiß näher stehen, und leicht resorbierbar sind, die Albumosen und Peptone haben einige so charakteristische biologische Reaktionen, daß, wenn sie irgendwie in größeren Mengen in das Blut übertreten würden, diese Reaktionen ihre Gegenwart anzeigen müßten. Diese Spaltungsprodukte haben ausgesprochene giftige Wirkungen, unter anderen heben sie die Gerinnbarkeit des Blutes auf, wirken auf das Herz schädlich und erniedrigen den Blutdruck. Zumeist wird angegeben, daß auch im Verdauungsstadium das Blut keine Stoffe mit derartigen Wirkungen mit sich führt. Nur unter ganz besonderen Bedingungen, bei künstlicher Anhäufung des Darmes mit Albumosen und unter Anwendung einer verfeinerten Versuchstechnik, ist es gelungen, den Uebertritt von Albumosen in die Leber zu erschließen. Auch mit chemischen Methoden, deren Genauigkeit gerade für diese dem Eiweiß sehr nahe stehenden Spaltungsprodukte allerdings keine große ist, glückte der Nachweis derselben nicht. Aber auch die tieferen kristallinischen, chemisch viel besser definierten stickstoffhaltigen Abbauprodukte des Eiweißes, die verschiedenen Aminosäuren finden sich im Blute nicht vor. Diese Tatsachen haben Veranlassung gegeben nach einer Erklärung hierfür zu suchen und dabei sind drei verschiedene Ansichten auf-

gestellt worden. Nach der ersten Ansicht fehlen die Eiweißabbauprodukte, weil sie während der Resorption von den Epithelzellen wieder zu Eiweiß synthetisiert werden und daher nicht mehr als solche vorhanden sein können. Nach der zweiten Ansicht werden die stickstoffhaltigen Eiweißabbauprodukte im Blute deshalb vermißt, weil sie während ihres Durchtrittes durch die Schleimhaut infolge Desamidierung (Entfernung der NH_2Gruppe) ihren Stickstoff verlieren. Nach der dritten Ansicht werden Eiweißabbauprodukte als solche wohl resorbiert, sie entziehen sich aber dem Nachweise, weil die Blutstromgeschwindigkeit eine so große ist, daß der Zuwachs innerhalb der kurzen Zeit der Blutentnahme keinen für unsere analytischen Methoden merklichen Ausschlag gibt.

Jede dieser Ansichten vermag sich auf Tatsachen und interessante Erwägungen zu stützen. Die erste Ansicht läßt Einklang zwischen der Fett- und Eiweißresorption bestehen, indem bei beiden die Synthese in der Darmschleimhaut eine Rolle spielt. Es wird dabei angenommen, daß eine Synthese zu den indifferenten Bluteiweißkörpern des betreffenden Tieres stattfindet. Biologisch hat dies den Sinn, daß dem übrigen Organismus Eiweiß in einer für ihn unschädlichen „bluteigenen und arteigenen" Form allerwärts zur passenden und spezifischen Verarbeitung durch die einzelnen Körperzellen dargeboten wird. Es ist gezeigt worden, daß nach Entziehung einer sehr großen Blutmenge bei Regeneration des Blutes stets die nämlichen Bluteiweißkörper gebildet werden, auch dann, wenn Eiweißkörper verfüttert werden, die in ihrem chemischen Aufbau sehr weit von demjenigen der Bluteiweißkörper abweichen. Diese Tatsache würde sich sehr gut auf Grund der ersten Ansicht erklären.

Die zweite Ansicht stützt sich darauf, daß tatsächlich die Desamidierung der Aminosäuren in einem speziellen Falle nachgewiesen wurde. In die Leibeshöhle von Holothurien eingebrachte Aminosäuren sind in der Außenflüssigkeit, in welche man das Tier gehängt hat, trotzdem sie resorbiert wurden, nicht mehr nachweisbar; hingegen hat der Ammoniakgehalt der Außenflüssigkeit zugenommen. Die wegen des fehlenden Kreislaufes sehr viel einfacheren und durchsichtigeren Verhältnisse bei den Holothurien gemahnen an die Tatsache, daß im Pfortaderblut namentlich während der Resorption mehr Ammoniak als sonstwo im Blute vorhanden ist.

Die dritte Ansicht darf sich vor allem darauf berufen, daß Resorption von Aminosäuren als solchen dann stattfinden muß, wenn nicht alle Bausteine des Eiweißes zur Synthese vorhanden sind. Es herrscht auch ziemlich allgemeine Uebereinstimmung darüber, daß zur Synthese aus diesem oder jenem Grunde nicht verwertbare Aminosäuren der Leber zugeführt werden und dort durch Umwandlung in Harnstoff für die Entfernung aus dem Körper durch den Harn vorbereitet werden. Sobald Aminosäuren in größeren Mengen in den Darm eingeführt werden, entgehen sie teilweise jeder Verarbeitung und gelangen als Aminosäuren im Harn zur Ausscheidung. Die dritte Ansicht ist biologisch gut fundiert. Ihr zufolge transportiert das Blut zu den einzelnen Organzellen die Bausteine, aus welchen sie unter Auslese des notwendigen die für jedes einzelne durchaus spezifischen Eiweißkörper aufbaut, und der unökonomische, dazwischengeschobene intermediäre Aufbau und Wiederzerfall der Eiweißkörper erübrigt sich. Sie wahrt der Leber, welche zuerst das aus dem Darm kommende, mit dem Material der Eiweißresorption beladene Pfortaderblut in Empfang nimmt, ihre wichtige Stellung als Regulator, indem dieselbe überflüssiges Stickstoffmaterial in zur Ausscheidung geeignete Formen umwandelt, zur Aufnahme noch nicht völlig passender Substanz hierzu umarbeitet.

Es ist durchaus möglich, daß das weitere Schicksal des resorbierten Eiweißmateriales sich so gestaltet, daß, je nach den Verhältnissen, jede der drei Ansichten den Tatbestand innerhalb gewisser Grenzen richtig wiederspiegelt; unzweifelhaft besitzt der Darm, wie jedes andere Organ, die Befähigung zur Eiweißsynthese, ebenso unzweifelhaft besitzt er desamidierende Eigenschaften infolge desamidierender Fermente und schließlich ist der Uebergang von Eiweißabbauprodukten in das Blut keine bloße Hypothese, sondern eine gesicherte Tatsache ebenso wie die genauer Messung zugängliche große Stromgeschwindigkeit des Blutes, welche zusammen mit dem unter normalen Bedingungen immer nur ganz allmählichen Uebertritt von Abbauprodukten einen hinreichenden Schutz gegen etwaige Schädigungen durch dieselben bietet.

Schließlich bleibt die oben angedeutete Frage, ob Eiweiß als solches zur Resorption gelangt. Das von uns in der Nahrung aufgenommene Eiweiß ist „artfremd" und dasselbe gilt von allen Lebewesen, die sich nicht von ihresgleichen ernähren. Artfremdes Eiweiß veranlaßt, wenn es in das Blut gelangt, eine vom Organismus ausgelöste Gegenreaktion, die Erzeugung eines Stoffes, Präzipitin genannt, welches das betreffende artfremde Eiweiß spezifisch zu fällen vermag. Es kann diese Reaktion als eine Schutzmaß-

regel des Organismus gegen das artfremde Eiweiß, welches auch sonst noch Schädigungen und ungewöhnliche Erscheinungen im Körper verursacht, angesehen werden. Da bei nicht unmäßigem Genuß von Eiweiß niemals im Blute eine Präzipitinreaktion beobachtet wird, folgt zwingend, daß fremdes, unverändertes, genuines Eiweiß nicht resorbiert wird. Da der Körper das artfremde zu arteigenem Eiweiß umbauen müßte, wäre auch von diesem Gesichtspunkte aus die Resorption von unverändertem Eiweiß nicht der einfachere Vorgang. Die Fermente des Verdauungskanales haben nun die Wirkung schon durch die früheste Spaltung des Eiweißes dasselbe biologisch zu denaturieren, ehe es seinen chemischen Charakter als Eiweiß verloren hat. Diese Seite der Fermentleistung ist von nicht zu unterschätzender Bedeutung; die eiweißartigen Spaltungsprodukte können ohne Antikörperbildung resorbiert werden. Ein Hauptgrund, weshalb lange Zeit daran festgehalten wurde, daß wenigstens einiges in Form von denaturiertem Eiweiß resorbiert würde, war die Meinung, daß der tierische Organismus nicht in der Lage sei, Eiweiß synthetisch aufzubauen. Seitdem nachgewiesen worden ist, daß der tierische Organismus, wenn ihm ausschließlich Aminosäuren beziehentlich Polypeptide in der richtigen Auswahl dargeboten werden, seinen Eiweißbestand erhalten und sogar durch Wachstum vermehren kann, also aus kristallinischen, nicht mehr eiweißartigen, stickstoffhaltigen Abbauprodukten Körpereiweiß synthetisieren kann, des weiteren auch die Synthese von einzelnen Aminosäuren aus Ammoniak und Fettsäuren im Körper entdeckt wurde, besteht nicht mehr der früher postulierte Zwang zur Eiweißresorption. Hält man die beiden Grundtatsachen zusammen, weitgehende Spaltung des Eiweißes zu tiefen Abbauprodukten und die Befähigung des Organismus aus diesem Eiweiß wieder aufzubauen und die niederen Bausteine des Eiweißes selbst schöpferisch zu produzieren, so scheint eine Resorption von Eiweiß selbst als überflüssig. So viel diese Ansicht für sich hat, es stehen ihr einige Erfahrungen entgegen. Blutserum eines Tieres in eine gereinigte Darmschlinge, in welche weder Magen- noch Pankreassaft Zutritt hat, eingebracht, wird glatt resorbiert. Zwei Eiweißkörper, welche sich durch sehr charakteristische Reaktionen scharf neben allen anderen nachweisen lassen, der Bence-Jonessche Eiweißkörper und Hemielastin, konnten im Blute als vom Darm aus resorbiert nachgewiesen werden. Die Heilwirkungen des Jodthyreoglobulins, des spezifischen Eiweißkörpers der Schilddrüse, treten nach bloßer Verfütterung ein; da die Heilwirkung an den ungespaltenen Eiweißkörper geknüpft ist, muß dieser teilweise ungespalten resorbiert worden sein. Angesichts dieser Tatsachen, die sich vermehren lassen, ist es geraten, bei dem Schlusse sich zu bescheiden, daß die Natur je nach ihren Bedürfnissen zwei Wege benutzt, um den Organismus mit Eiweiß zu versorgen: vollständige Aufspaltung und Wiederaufbau einerseits, andererseits Resorption von Stoffen, die chemisch noch Eiweiß sind.

2d) Physiologische Vorgänge bei der Resorption. Während der Resorption ist die Darmschleimhaut gerötet, infolge größerer Blutversorgung. Die vermehrte Blutversorgung ist in ihrer Größe durch geeignete Apparate gemessen worden. Wie in anderen Organen ist im Darme erhöhte Wärmebildung und das Auftreten elektromotorischer Kräfte während der Tätigkeit zu registrieren. Noch wichtiger ist, daß der anderwärts als sicherstes Zeichen chemischer Tätigkeit während der physiologischen Leistung zu konstatierende vermehrte Sauerstoffverbrauch und die vermehrte Kohlensäurebildung sowohl bei der Resorption organischer Stoffe, wie auch bei derjenigen unorganischer Lösungen beobachtet werden konnte. Selbst die letztere ist demnach begleitet von aktiven Vorgängen in der Darmschleimhaut. Die mikroskopische Untersuchung deckt markante Unterschiede im feineren Bau der resorbierenden und nicht resorbierenden Darmzotte auf. Insbesondere zeigt sich, daß der leukocytäre Apparat der Zotte regen Anteil bei der Resorption nimmt, denn je nach der Intensität des Prozesses wird die Gesamtzahl und die relativen Mengen der einzelnen Leukocytenarten typisch verschieden. Die mikroskopischen Befunde haben Veranlassung gegeben, die Ansicht aufzustellen, daß speziell an der Resorption der Fette und Eiweiße die Leukocyten beteiligt seien.

2e) Spezieller Mechanismus der Darmresorption. Die Betrachtung der natürlich ablaufenden Resorption im Verdauungskanal gibt keine entscheidenden Kriterien an die Hand, ob zur Resorption die eingangs dargelegten physikalisch-chemischen Mechanismen hinreichen oder ob noch besondere vitale Prozesse hinzukommen. Erst das Experiment verhilft hierzu. Wohl die bedeutsamste hierdurch gewonnene Tatsache ist die, daß im Darm Serum vom nämlichen Tier resorbiert wird. Diffusion und Osmose können diesen Vorgang nicht erklären, weil kein Unterschied des Diffusionspotentials und des osmotischen Druckes vorhanden ist. Ebensowenig können Löslichkeits- und Adsorptionserscheinungen im Spiele sein, weil auf beiden Seiten der trennenden Membran gleiche Verhältnisse vorliegen. Daher nimmt man an, daß die Resorption körpereigenen Serums eine Aeußerung der

Aktivität der lebendigen Darmzelle sei. Die im voraufgehenden Abschnitte dargelegten physiologischen Vorgänge bei der Resorption ergaben objektive Anhaltspunkte für das mit Energieverbrauch verlaufende Walten der Zellaktivität, selbst bei der einfachen Resorption von Salzlösungen. Nicht minder bemerkenswert ist die Tatsache, daß Zucker und Kochsalz, solange die Darmwand normal ist, nur in der Richtung vom Darm zum Blut und nicht umgekehrt wandern, daß aber alles sofort nach den Regeln der Diffusion oder Osmose verläuft, sowie die Darmepithelzelle mit (Fluornatrium z. B.) vergiftet worden ist. Zwar wird auch an toten Membranen Einseitigkeit der Richtung beobachtet (s. oben), aber die Unterschiede sind hier größer und vor allem wandelt etwas, was ohne erkennbare Strukturveränderung die Lebenstätigkeit der Zelle aufhebt, den Vorgang in einen den physikalisch-chemischen Regeln folgenden um.

Die Fähigkeit lebendiger Zellen lipoidlösliche Stoffe leicht aufzunehmen ist hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Resorption vielfach herangezogen worden. Experimentell wurde gefunden, daß allerdings eine große Zahl lipoidlöslicher Stoffe dem Grade ihrer Lipoidlöslichkeit nach rasch aus dem Darm verschwinden. Die Resorption dieser Klasse von Stoffen folgt daher dem Verteilungssatze, läßt sich als ein spezieller Fall der Verteilung nach der Löslichkeit betrachten. Aber gerade diejenigen Stoffe, welche biologisch von der größten Bedeutung sind, wie die Aminosäuren, der Zucker, die Salze, sind nicht lipoidlösliche Körper; die Resorption derselben kann mit dem Lipoidgehalt der Darmzellen nichts zu tun haben und man kommt auf dem Wege des Ausschlusses auch hier dazu, die Resorption auf aktive Prozesse der Darmepithelzelle zurückzuführen. Die Hypothese, daß nicht lipoidlösliche Stoffe zwischen den Epithelzellen, die lipoidlöslichen durch die Epithelzellen hindurchtreten, sei erwähnt; ein Bedenken allgemein biologischer Natur gegen dieselbe ist, daß sie gerade bei den wesentlichsten Arten der Resorption die Zellen unbeteiligt sein läßt.

Es hat sich gezeigt, daß in den Darm eingebrachte hypotonische, hypertonische und mit dem Blute isotonische Lösungen von Kristalloiden resorbiert werden. Trotz der scheinbaren Verschiedenheit lassen sich alle drei Arten auf die im Anfang dieses Artikels auseinandergesetzten physikalisch-chemischen Prinzipien zurückführen. Durch physikalische Vorgänge werden die nicht isotonischen Lösungen zur Isotonie gebracht und es bleibt dann die Triebkraft übrig, welche vom osmotischen Druck der nicht durch die Zellen des Darmes hindurchtretenden Eiweißkörper des Blusplasmas herrührt. Es muß aber im Auge behalten werden, daß mit dem Nachweis der Möglichkeit, die Resorption von Salzlösungen auf bekannte, einfache physikalisch-chemische Vorgänge zurückzuführen, nicht gesagt ist, daß in Wirklichkeit der Mechanismus der Resorption ein derartiger ist. Solange die Tatsache zu Recht besteht, daß bei der Resorption Prozesse, denen Energieumwandlungen zugrunde liegen, beobachtbar sind, sind diese als Zeugen aktiven Geschehens in der lebenden Zelle anzuerkennen.

3. **Die parenterale Resorption.** Die wesentlichsten Orte der parenteralen Resorption sind das interstitielle Gewebe und die serösen Höhlen. Unter natürlichen Bedingungen werden dort nur körpereigene Stoffe resorbiert. Die Erforschung des Mechanismus der parenteralen Resorption gründet sich fast ausschließlich auf Untersuchungen, in denen künstlich Flüssigkeiten eingeführt wurden, die entweder in ihren quantitativen Verhältnissen von den normalen Flüssigkeiten abwichen oder qualitativ durch Gehalt an körperfremden Stoffen oder auch Stoffen, die an dem betreffenden Ort nicht zur Resorption gelangen. Wie schon früher erwähnt wurde, ruft die parenterale Injektion von Eiweißkörpern und von Enzymen aller Art die Bildung von Antikörpern hervor.

3a) Die interstitielle Resorption. Ueberall zwischen den Zellen der Gewebe sind feine Räume, welche mit der sogenannten Gewebsflüssigkeit erfüllt sind. Die Gewebsflüssigkeit ist das innere „Milieu" der Zellen (über Zusammenhang und Bildung vgl. den Artikel „Lymphe") und als solches allen Wechseln unterworfen, die aus der Tätigkeit der umgebenden Zellen hervorgehen. Daraus ergibt sich, daß fortwährende Unterschiede zwischen Gewebsflüssigkeit und Blut entstehen, die Veranlassung zum osmotischen Ausgleich geben können. Am beständigsten ist die Bildung von Kohlensäure, weil alle lebenden Gewebe einen respiratorischen Stoffwechsel besitzen; die Kohlensäure wird, zum größten Teile in Form von Carbonaten, von den Blutgefäßen aufgenommen. Auch alle anderen Stoffwechselprodukte, soweit ihnen nicht der Lymphweg angewiesen ist (vgl. den Artikel „Lymphe"), werden von den Blutgefäßen resorbiert. Daß körperfremde Stoffe von den Blutgefäßen resorbiert werden, wurde durch Experimente erwiesen, in denen jede andere Möglichkeit, insbesondere der Lymphweg, ausgeschlossen wurde. Außerordentlich leicht wird Wasser nicht allein vom Blute abgegeben, sondern auch von den Blutgefäßen aus den Geweben resorbiert. Sofort nach einem Blutentzuge kann eine Verdünnung des Blutes konstatiert werden, die vom Flüssigkeitsübertritt aus der Ge-

websflüssigkeit herrührt. Diese letztere Resorption hat zwei verschiedene Erklärungsarten gefunden: Nach der einen tritt infolge der Herabsetzung des Blutdruckes nach dem Blutentzug eine Rückfiltration ein, nach der anderen übt das Blutplasma wegen seines höheren Eiweißgehalts einen osmotischen Zug auf die Gewebsflüssigkeit aus, welcher bei Senkung des Blutdruckes den Kapillardruck überwindet. Beide Vorstellungen kommen mit bekannten physikalisch-chemischen Kräften aus. Die Resorption von isotonischen, hypertonischen und hypotonischen Lösungen, welche subkutan injiziert wurden, ist gleichfalls aus denjenigen physikalisch-chemischen Regeln ableitbar, welche im Eingang dieses Artikels zusammengestellt wurden. Aber wiederum begegnen wir einzelnen Tatsachen, die in das Schema physikalisch-chemischer Erklärungen nicht recht hineinpassen. Isotonisches Blutserum, welches in die für Beobachtung außerordentlich günstige Bindehaut des Auges injiziert wird, gelangt zur Resorption, wie es scheint, so rasch wie eine Kochsalzlösung. An dem nämlichen Ort wurde beobachtet, daß bei der Resorption von Lösungen die Reizwirkung derselben auf das umgebende Gewebe nicht ohne Einfluß ist; die Reizung ist ein spezifischer, an den lebenden Zustand geknüpfter Vorgang. So stellen sich bei näherer Betrachtung Erfahrungen ein, welche auf physiologische Leistungen bei der interstitiellen Resorption hinweisen; wenn die physikalisch-chemische Erklärung hier weiter reicht als bei der Darmresorption, so kommt das daher, daß jene von den mehr indifferenten Endothelzellen der Kapillargefäße bewerkstelligt wird.

3b) Resorption aus serösen Höhlen. Unter serösen Höhlen werden die mit Endothelzellen bekleideten Räume verstanden, die je nach dem Organ, dem sie zugehören, ihren Namen tragen: Herzbeutel, Pleuralraum, Peritonealraum, Cerebrospinalhöhle und die verschiedenen Gelenkhöhlen. Dieselben sind in der Norm mit geringen Mengen einer Flüssigkeit von wechselnder Beschaffenheit erfüllt (vgl. den Artikel „Lymphe“), die ständiger Bildung und ständiger Resorption unterworfen ist. Alle diese Höhlen sind mit einer Schicht von platten Endothelzellen ausgekleidet; erst unter diesen liegen die Blutkapillaren in einen spärlichen faserigen Grundgewebe. Manchen Ortes stoßen die Enthodelzellen derart aneinander, daß sie kleine Oeffnungen, Stomata, freilassen, von denen aus die feineren Lymphgefäße injiziert werden können.

Die serösen Höhlen der Brust und namentlich des Bauches — lassen sich leicht mit größeren Flüssigkeitsmengen anfüllen und wieder entleeren; aus diesem Grunde sind sie gern zu Resorptionsstudien benutzt worden und auch deshalb, weil man leichter als anderwärts die Resorption durch die Kapillargefäße glaubte ermitteln zu können. Zwar ist diese Meinung im wesentlichen richtig; nichtsdestoweniger ist noch die Schicht lebender Endothelzellen vorhanden, deren etwaiger Anteil an der Resorption der Berücksichtigung bedarf.

Die verschiedene direkte Kommunikation der Lymphbahnen mit den serösen Höhlen legt den Gedanken nahe, daß hier der Weg der Resorption durch die Lymphbahnen gehe. Versuche haben aber dahin entschieden, daß die Blutkapillaren die Resorption ganz übernehmen; denn weder bei Einführung von Salzlösungen noch von Eiweißlösungen (Blutserum) konnte eine Vermehrung des Lymphflusses aus dem großen Brustlymphgang beobachtet werden.

Salzlösungen, welche mit dem Blutplasma nicht isotonisch sind, werden durch Diffusion und Osmose rein auf physikalisch-chemischem Wege isotonisch. Im Unterschiede von der Resorption im Darm ist die Richtung des Austausches keine einseitige, sondern Kochsalz sowohl wie Wasser wandern, wo es der Konzentrationsunterschied erfordert, aus dem Blute in die seröse Höhle. Eine vergleichende Prüfung der Resorptionsgeschwindigkeit verschiedener Kristalloide, z. B. von Harnstoff, Kochsalz und Traubenzucker lehrt, daß diese im engsten Zusammenhange mit der Geschwindigkeit steht, mit welcher die genannten Stoffe physikalisch durch Membranen diffundieren, da die Reihenfolge in beiden Fällen die gleiche ist.

Da alle genannten Lösungen isotonisch werden, reduziert sich das Problem auf dasjenige der Resorption isotonischer Salzlösungen. Dieselbe verläuft sehr langsam; sie läßt sich, wie schon früher besprochen wurde, ohne Mithilfe vitaler Kräfte erklären, wenn man das osmotische Wasseranziehungsvermögen der Bluteiweißkörper daran beteiligt sein läßt. Diese Erklärung reicht aber nicht aus für die zwar gleichfalls langsam verlaufende, jedoch recht deutliche Eiweißresorption. Nicht allein aus konzentrierten, sondern auch aus verdünnten Lösungen wird Eiweiß entgegen dem Diffusionsgefälle resorbiert. Eine rein physikalische Erklärungsmöglichkeit hat sich dadurch eröffnet, daß gezeigt werden konnte, wie mit der Größe des hydrostatischen Druckes in der Bauchhöhle die Resorption zunahm. Dieses Phänomen ist ein reiner Filtrationsvorgang, da es bestehen bleibt, nachdem das lebende Endothel, ja das Tier selbst, abgetötet worden ist. Doch bleibt es zweifelhaft, ob die physiologische Resorption und das Verschwinden der Flüssigkeit am toten Tiere wirklich wesensgleich sind. Die weitgehende Uebereinstimmung der bei Resorption in serösen Höh-

len eintretenden Geschehnisse mit dem, was auf Grund unserer physikalisch-chemischen Erkenntnis zu erwarten steht, beruht zum guten Teil darauf, daß den serösen Höhlen im physiologischen Experiment Aufgaben zugemutet werden, denen sie nicht angepaßt sind. Wo eine Leistung fehlt, auf welche hin die lebenden Zellen eingerichtet sind, ist es naturgemäß, daß die trennenden Membranen sich verhalten, wie sie es allgemein auf Grund ihrer physikalisch-chemischen und strukturellen Beschaffenheit tun würden. Sobald Anpassungsvorgänge physiologischer Art geweckt werden, offenbaren sich am Resorptionsprozeß physiologische Funktionen der beteiligten Gebilde. Die Eiweißresorption, die an und für sich physikalisch-chemisch nicht klar gelegt ist, wird stärker, wenn der Organismus an seinem Eiweißgehalt eingebüßt hat. Kochsalz, welches vom Blute im Diffusionsversuch leicht an eine kochsalzarme Flüssigkeit in der Bauchhöhle abgegeben wird, wird zurückgehalten, sobald der Organismus, ohne Aenderung der Kochsalzkonzentration im Blute, Kochsalz verloren hat. Im Lichte aller dieser Erfahrungen stellt sich die parenterale Resorption als ein Vorgang dar, welcher in eigentümlicher und sinngemäßer Weise eine Kombination rein physikalisch-chemischer und speziell physiologischer Akte darbietet.

Literatur. *Zusammenfassende Darstellungen, aus denen die Literatur bis Ende 1911 ersichtlich ist:* **W. Biedermann,** *Wintersteins Handbuch der vergleichenden Physiologie, Bd. III.* — **O. Cohnheim,** *Nagels Handbuch der Physiologie. Bd. III.* — **U. Friedemann,** *Oppenheimers Handbuch der Biochemie, Bd. III, 2.* — **Hamburger,** *Osmotischer Druck und Ionenlehre, Wiesbaden 1904.* — **R. Höber,** *Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe, Leipzig 1911.* — **J. Munk, Asher-Spiro,** *Ergebnisse der Physiologie, I, 1, 1902.* — **Overton,** *Nagels Handbuch der Physiologie, Bd. III.* — **E. H. Starling,** *Oppenheimers Handbuch der Biochemie, Bd. III 2.*

L. Asher.

Respirationsorgane, Atmungsorgane.

1. Definition und allgemeine Beziehungen der Respirationsorgane. Die Atmungsorgane vermitteln den Gasstoffwechsel der Lebewesen, der bei den Tieren darin besteht, daß Sauerstoff aufgenommen und Kohlensäure abgegeben wird. Diesen Prozeß bezeichnen wir als Atmung. Da sich die Existenz aller ursprünglichen Lebewesen an das Wasser knüpft, so finden wir auch, daß die erste Atmung durch Wasser vermittelt wird, indem der im Wasser verteilten Luft der Sauerstoff entnommen wird. Die landlebenden Tiere vermögen den Sauerstoff direkt der Luft zu entnehmen, jedoch knüpfen ihre Atmungsorgane meistens ontogenetisch eng an die an das Wasser angepaßten Atmungsorgane an, häufig kommen auch selbständige Bildungen zur Entwickelung. Die Aufnahme von Sauerstoff ist nicht durch eine besondere Tätigkeit der Zelle bedingt, sondern geht passiv vor sich, etwa in der gleichen Weise wie das Wasser Sauerstoff aus der Luft aufzunehmen imstande ist. Die Sauerstoffaufnahme kann als ein Diffusionsvorgang angesehen werden, wodurch ein Ausgleich der Sauerstoffspannung stattfindet.

Eine Atmung kann nun überall da erfolgen, wo der Sauerstoff eine Möglichkeit zur Diffusion vorfindet. Bei wasserlebenden Tieren kann sie also an der gesamten Körperoberfläche vorgehen, da eine feste kutikuläre Abscheidung der Ektodermzellen gegen das äußere Medium in den meisten Fällen noch nicht stattgefunden hat. Auch mehr oder weniger große Teile des Darmkanals, also entodermale Zellen, können für die Atmung in Betracht kommen. Wird nun der Körper bei wasserlebenden Tieren mit schützenden Panzern oder bei landlebenden mit verhornten Teilen der Epidermis umgeben, so muß natürlich die Atmung auf bestimmte freibleibende Zellpartien lokalisiert werden und dadurch kommen dann die mannigfachsten Einrichtungen zustande, die alle den gleichen physiologischen Zweck eines Atmungsorganes haben. Diese Organe sind so mannigfach innerhalb der Tierreihe und selbst bei verwandten Formen ausgebildet, daß sie oft weder morphologisch noch ontogenetisch irgendwelche Beziehungen zueinander haben. Dadurch gestaltet sich natürlich eine rein mor-

phologische Schilderung dieser Organe ungemein schwierig. Im allgemeinen kann man wohl sagen, daß die Hautatmung und die sich davon herleitenden Atmungsorgane bei den wirbellosen Tieren die Hauptrolle spielen. Daneben kommt aber auch jeweilig die Darmatmung zur Geltung. Bei den Wirbeltieren knüpfen sich die Atmungsorgane, abgesehen von der auch hier noch in untergeordneter Weise vorkommenden Hautatmung, ausschließlich an den Vorderdarm an. Die niederen wasserlebenden Chordaten bieten uns noch ein einheitliches Bild der Darmkiemenatmung dar, derart, daß der Vorderdarm durch Spalten mit der Außenwelt in Verbindung steht. Bei den Amphibien kommt nun innerhalb der Entwickelung zunächst noch die Kiemenatmung bei den Larven zur Geltung und auch alle höheren landlebenden Vertebraten weisen noch Kiemenspalten in ihrer Entwickelung auf. Bei den Amphibien, beim Uebergang zum Landleben, und bei den Amnioten kommt dann ein anderes Atmungsorgan zur Ausbildung, das sich ebenfalls genetisch an den Vorderdarm und auch an die Kiemen anknüpft, es ist das die Lunge, der dann das neue Atemmedium, die Luft, durch bestimmte Luftwege zugeführt werden muß.

Für alle Atmungsorgane ohne Ausnahme ist charakteristisch, daß sie reich mit Kapillaren durchsetzt sind. Auf diese Weise wird es möglich, daß das den Atmungsorganen zugeführte venöse Blut arteriell gemacht wird, indem der aufgenommene Sauerstoff locker an das Hämoglobin oder ähnliche eisenhaltige Eiweißstoffe gebunden wird. Diese Kapillarverzweigung der Blutgefäße in oder an den Atmungsorganen fehlt nur den Tracheaten, wo die Atmungsorgane, die Tracheen, sich kapillar verzweigen, um so zu dem lakunären Blutgefäßsystem heranzugelangen. Hier suchen, wie das Cuvier definierte, die Atmungsorgane das Blut auf, während sonst, wie z. B. besonders in den Lungen der Vertebraten, das Blutgefäßsystem die Atmungsorgane aufsucht (Näheres siehe im Artikel „Cirkulationsorgane“)

2. Tiere ohne Respirationsorgane und primitive Zustände der Hautatmung. Bei den Protozoen und sonstigen niederen, besonders sehr kleinen wirbellosen Tieren fehlen eigene Respirationsorgane. Bei den Protozoen ist das ohne weiteres verständlich, denn sie haben nur eine sehr geringe Größe, ihre Oberfläche ist daher im Vergleich zum Volumen gewaltig, zumal Pseudopodien, Geißeln und Wimpern das Verhältnis noch mehr verschieben. Den Gasstoffwechsel befördert wahrscheinlich auch noch die Protoplasmaströmung der Rhizopoden und die schnelle Ortsbewegung der anderen bewimperten Protozoen. Bei manchen einzelligen Tieren, auch einigen Coelenteraten und Strudelwürmern (Hydra viridis und Convoluta) wird der Sauerstoffbedarf durch chlorophyllhaltige Algen geliefert, die symbiontisch mit diesen Tieren leben.

Auch den Coelenteraten fehlen spezialisierte Atmungsorgane. Die Respiration wird hier größtenteils durch die gesamte Körperoberfläche, dann aber auch durch das Gastrovaskularsystem vollzogen, das also hier in gleicher Weise der Ernährung und dem Gasaustausche dient. Durch den Reichtum an Tentakeln wird außerdem eine Vergrößerung der Außenfläche des Körpers erzielt; und wenn schließlich, wie das bei vielen sessilen Coelenteraten der Fall ist, der Körper in einer kalkigen Tube steckt, und das Körperektoderm für die Respiration ungeeignet wird, übernehmen die Tentakel den Hauptteil der Atmung. Den Siphonophoren mit Ausnahme der Calycophoren

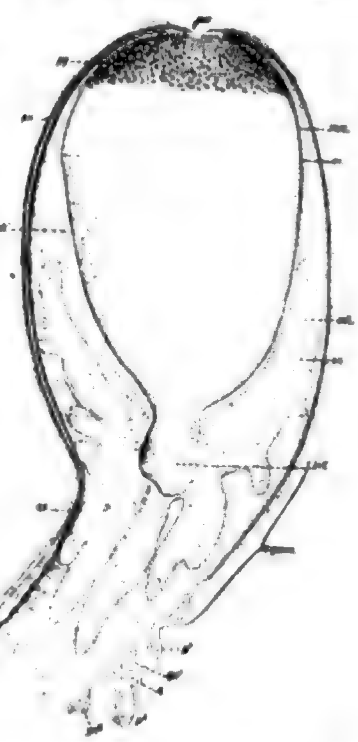


Fig. 1. Rhizophysa filiformis. Halbschematische, aus einer Längsschnittserie rekonstruierte Darstellung des Baues einer mittelgroßen Pneumatophore; ca. 20 mal vergrößert. por Luftporus. pg pigmentierte Region des Luftsackes. pn Luftschirm. ek″ Gasdrüse (sekundäres Ektoderm), en Entoderm, tr Stamm, go^1 go^2 Knospen für die Gonophorentrauben, t Tentakel, p Magenschlauch, z germ Keimzone auf der Ventralfläche der Pneumatophore, inf Lufttrichter, cell kolbenförmige Riesenzellen; m oberer Rand der Gasdrüse, sacc Luftsack. Nach Chun.

sollen nach einigen Autoren spezialisierte Respirationsorgane in Form von Schwimmblasen (Fig. 1 sacc.) zukommen. In der Hauptsache wird dieses Organ aber wohl

ein hydrostatisches sein, das durch besondere Gasdrüsen prall mit Luft gefüllt wird.

Auch allen Würmern mit Ausnahme einiger Anneliden kommt noch die diffuse oder Hautatmung zu. Unterstützt wird sie bei den Turbellarien z. B. durch die Bewimperung des Körpers, bei den Rotatorien durch das Räderorgan. Auch der Gastrovaskularraum der Turbellarien spielt nach von Graff für die Respiration eine Rolle, indem er zur Aufnahme und Abgabe von Wasser geeignet ist.

3. Respirationsorgane, die sich genetisch von der Haut ableiten. 3a) Anneliden. Die erste Sonderung von Organen für die Atmung treffen wir bei den Anneliden an. Sie nehmen alle ihren Ursprung von dem Körperektoderm. Derartige Atmungsorgane sind aber nicht durchweg in der ganzen Klasse vorhanden, wir finden oft bei nahe verwandten Formen alle Uebergänge von der diffusen Hautatmung bis zur Kiemenatmung. Die große Mehrzahl der Anneliden besitzt noch die primitive diffuse Hautatmung, die aber insofern schon vervollkommnet worden ist, als reichlich Blutgefäße sich unmittelbar unter der Haut ausbreiten oder sogar in die Zellen der Epidermis eindringen. Als erstes Auftreten von Kiemenbildung haben wir nun solche Partien der Körperoberfläche zu bezeichnen, wo sich die Gefäßnetze besonders dicht ausbreiten, wie z. B. bei Nereis und anderen Polychaeten (Fig. 2A bis D) in den Parapodien,

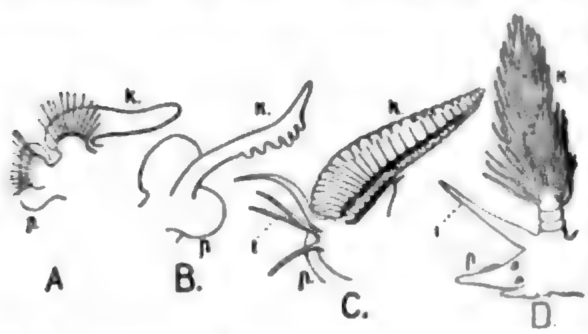


Fig. 2. Errante Polychäten. Verschiedene Kiemenformen. A von Aonis foliacea. B von Heteronereis Oerstätii. C von Chloe fulva. D von Diopatra gallica. k Kiemen, p Parapodium, t Taster. Nach E. de Claparède. Aus Haller.

denn dort ist eine erhöhte Möglichkeit gegeben, Sauerstoff an das Blut zu binden und es arteriell zu machen. Zwecks Vergrößerung der respiratorischen Oberfläche können dann diese Partien in einfache sackförmige Ausstülpungen des Integuments umgestaltet werden, wie das z. B. bei den Glyceriden der Fall ist. Diese besonderen Anhänge oder Cirren zeichnen sich nun weiter durch ihre reiche Verästelung und Blutversorgung aus und sind so besonders für eine energische Sauerstoffaufnahme geeignet; derartige hochentwickelte Kiemen kommen den Eunicididen und Arenicoliden zu (Fig. 2). Bei vielen anderen festsitzenden Würmern kommt ein sogenannter Kiemententakelkranz vor (Fig. 3K), der aber nach neuerer Forschung hauptsächlich zur Herbeistrudelung der Nahrung

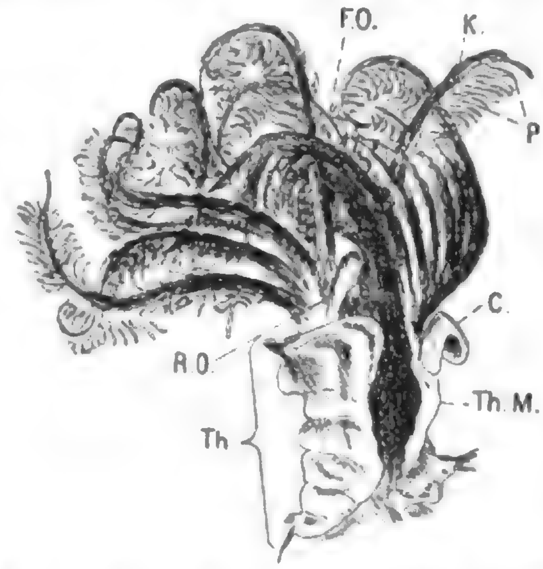


Fig. 3. Hydroides pectinata Phil. Kiemenkrone. C Collare, FoRo funktionelles und rudimentäres Operculum, K Kiemenstrahl, P Pinnulae, Th Thorax, ThM Thoraxmembran. Original.

dienen soll und nebenbei noch sensorische Funktionen hat. Für die Respiration soll er nicht mehr in Betracht kommen als die übrigen Teile der Körperoberfläche. Den Oligochaeten und Hirudineen kommen, was die Süßwasserformen anbetrifft, keine Kiemenanhänge zu, doch ist die Haut sehr reichlich vaskularisiert (Fig. 4 A, B). Unter

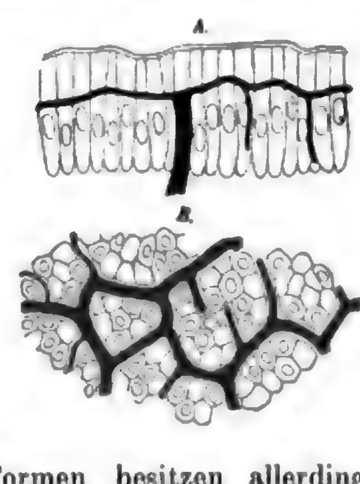


Fig. 4. Blutegel. Interepitheliale Blutgefäße in der Haut. A Epidermis im Querschnitt. B von der Fläche gesehen. Aus Hesse.

den marinen Formen besitzen allerdings Pontobdella und Cystibranchus Hautpapillen und Gefäßnetze, die man als Kiemen bezeichnen kann. Branchellion besitzt an jedem Segment verästelte gefäßführende Anhänge, die als Kiemen funktionieren.

Bezeichnend für die Respirationsorgane der Polychaeten ist besonders, daß das Körperepithel an ihnen außerordentlich verdünnt ist (Eisig), wodurch natürlich der Gasaustausch erleichtert wird. Auch den Gephyreen fehlen besondere Atmungsorgane. Ob die oft sehr langen Tentakeln für die Respiration in Betracht kommen, ist zweifelhaft, wird jedoch von einigen Forschern behauptet (Schneider).

Bei den kiemenlosen Anneliden wird die Atmung durch den Darmkanal unterstützt. So beobachtete Quatrefages häufig Aufnahmen größerer Wassermengen bei Syllis, die in kleinen Portionen wieder entleert wurden, Eisig beobachtete bei Hesione sicula eine auffällig reiche Vaskularisation der Darmschleimhaut, die sich sogar interzellulär ausdehnte. Außerdem fand er noch schwimmblasenähnliche Organe als Auswüchse des Vorderdarmes, die mit dem Darm durch verschließbare Oeffnungen in Verbindung stehen. In ihnen ist eine klare Flüssigkeit enthalten, die aus Seewasser mit wechselnden Mengen von Gas besteht. Die Aufnahme von Seewasser konnte leicht durch Karminbeimischung festgestellt werden, jedoch wurden Luftblasen nicht aufgenommen; wahrscheinlich wird in diese Blasen vermittels der vaskularisierten Schleimhaut Gas sezerniert, so daß diese Organe als Sauerstoffreservoire dienen können. Sie treten in Funktion, wenn der Darm während des Fressens nicht für die Respiration verwandt werden kann. Auch bei den Capitelliden und Gephyreen spielt die Darmatmung eine große Rolle, während sie bei den Landanneliden außerordentlich fraglich ist, trotzdem die Morrenschen Kalkdrüsen neuerdings von Brandes und Combault als Respirationsorgane gedeutet worden sind. Diese Drüsen sind periösophageale Hohlräume, die von zahlreichen parallelen Lamellen durchzogen sind. Durch peristaltische Bewegungen soll eine Aspiration und Ausstoßung von Wasser in diesen Organen bewirkt werden. Wenn diese Funktion zutrifft, so kann sie jedoch nur eine sehr untergeordnete sein, da wir es ja hier mit landlebenden Tieren zu tun haben, die nur zuweilen genügend Feuchtigkeit zur Atmung zur Verfügung hätten.

Bei vielen Anneliden mit diffuser Hautatmung wird die Erneuerung des Atemwassers durch schwingende Bewegung des ganzen Körpers bewirkt, so sitzen z. B. die Tubificiden mit ihrem Vorderende im Schlamm eingegraben, während das herausragende Hinterende fortwährend hin und her schlägt. Die Egel dagegen setzen sich mit ihrem Endsaugnapf fest und setzen ihren Körper in wellenförmige Bewegung.

3b) Echinodermen. Die meisten höheren wirbellosen Tiere besitzen chitinöse oder kalkige Panzer, wodurch natürlich eine Herausbildung von spezialisierten Atmungsorganen Bedingung wird. Es kämen hier in Betracht die Echinodermen, Arthropoden und Mollusken. Bei ersteren ist meist ein sehr dicker Kalkpanzer vorhanden, sodaß also die gesamte Körperoberfläche nicht mehr für die Respiration verwertbar ist. Trotzdem wir nun wissen, daß das Atembedürfnis dieser Tiere ein sehr großes ist, wissen wir sehr wenig über ihre Respirationsorgane. Das hat zum Teil seinen Grund darin, daß die Echinodermen im ausgewachsenen Zustande wesentlich abweichend von allen anderen Tieren gebaut sind. Bei ihnen sind drei Hohlraumsysteme ausgebildet, die Leibeshöhle, das Wassergefäß- und das Blutgefäßsystem, allen dreien kommen verschiedene Flüssigkeiten zu. Dem Blutgefäßsystem muß infolge seiner primitiven Ausgestaltung (s. den Artikel „Cirkulationsorgane") jede Beziehung zur Respiration abgesprochen werden. Wahrscheinlich ist es die Periviszeralflüssigkeit, die indirekt in Beziehung zur Atmung steht, indem die Wimpern der Leibeswand diese eiweißhaltige Flüssigkeit in Bewegung setzen. Es kämen also vor allem die Ein- und Ausstülpungen der Leibeshöhlenwand als Atmungsorgane in Betracht, da hier die Möglichkeit des Gasaustausches mit den äußeren respiratorischen Medien vorliegt. Auch die Flüssigkeit des Wassergefäßsystems hat vielleicht, da sie eiweißhaltig ist, indirekte Beziehung zur Respiration, etwa wie das Blut der höheren Tiere. Aus diesen Erwägungen heraus können nun die mannigfachsten Organe für die Respiration in Betracht kommen. So kennen wir bei den Seesternen kleine bläschenförmige Erhebungen, die Papillen (Fig. 5), die als



Fig. 5. Asterina exigua. Längsdurchschnitt durch eine eingezogene Papula. 110 fach vergrößert. a äußeres Körperepithel, b Peritonealepithel, c Kalkstück der Haut, d Hohlraum im Umkreis der Basis der Papula, e Innenraum der Papula, der Pfeil bezeichnet die Mündung der Leibeshöhle in die Papula. Nach Ludwig. Aus Hamann.

Kiemenbläschen oder Hautkiemen bezeichnet werden können. Es sind dies Ausstülpungen der Leibeshöhle, in denen die Leibeshöhlenflüssigkeit durch Wimperschlag und Kontraktion des ganzen Bläschens vermittels dünner Muskelschichten der Wand zirkuliert. Für die Funktion dieser Gebilde als Kiemenbläschen spricht die Beobachtung MacBride's, der sie bei Astropectiniden auf die aborale dorsale Region beschränkt fand. Es ist dieses die einzige Partie, die bei diesen sandbewohnenden Tieren frei ins Wasser vorragt. Bei den Ophiuriden kommen taschenartige Einstülpungen des Integuments

vor, die als Bursae oder Genitaltaschen (Fig. 6) bezeichnet werden, in Betracht. Sie

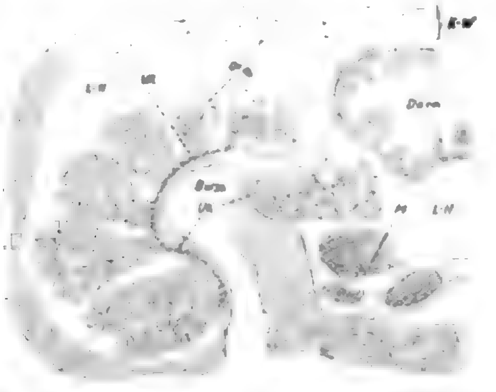


Fig. 6. Ophioglypha albida. Längsschnitt durch eine Bursa. L-H Leibeshöhle, Ov Ovarialsäckchen, K-W Körperwand. Uk Urkeimzellen. Nach Hamann.

liegen zu jeder Seite der Arme, besitzen eine äußerst zarte Wand und sind innen mit Wimperepithel ausgekleidet, wodurch eine

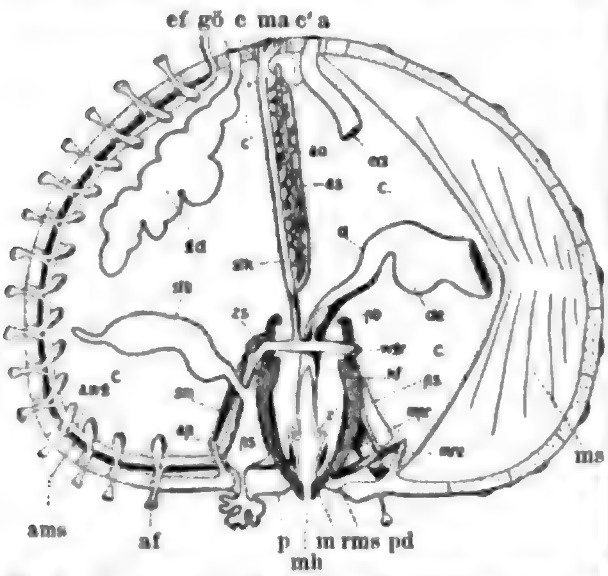


Fig. 7. Regulärer Seeigel. Halbschematischer senkrechter Schnitt. Links ambulakral, rechts interambulakral (doch ist an den Mundteilen diese Richtung nicht streng eingehalten). c Hauptcölom, ps Periösophagealsinus, p Papula, stb Stewardsche Blase, wgr Wassergefäßring, pb Polische Blase, stk Steinkanal, ma Madreporenplatte, ao Achsenorgan, as Achsensinus und c dessen Mündung in den Steinkanal, awg Ambulakralschlauch, af Füßchen, ab Ampulle, ef Endfüßchen, rms Nervenring, ams Ambulakralstrang, m Mund, d Darm, ed Enddarm, a After, gd Genitaldrüse, z Zahn, kf Kiefer, zs Zwischenkiefer, mh Mundhaut, mre Musculus retractor, mpr Musculus protractor, sm Oeffner, ms Muskelseptum. Nach Haller.

Wassererneuerung erzielt wird. Nach Cuénot werden sogar durch Heben und Senken der Körperscheibe Atmungsbewegungen ausgeführt. Für die Haarsterne sind nach demselben Autor die überaus zarten Tentakeln zur Atmung am geeignetsten.

Die Leibeshöhle der Echinoideen zerfällt in mehrere Abschnitte, aber nur der den Kauapparat umgebende Teil, der peripharyngeale Sinus, der durch die Laternenmembran von der übrigen Leibeshöhle vollständig abgetrennt ist, hat respiratorische Bedeutung. Dieser Abschnitt (Fig. 7) zeigt bei fast allen regulären Seeigeln kleine Ausstülpungen, die in Form von fünf Paar büschelförmigen Anhängen der Mundhaut ansitzen (p), sie werden als äußere Kiemen bezeichnet. Außerdem sind noch zehn innere Ausstülpungen vorhanden, nämlich fünf radiäre Gabelblasen oder Stewart-

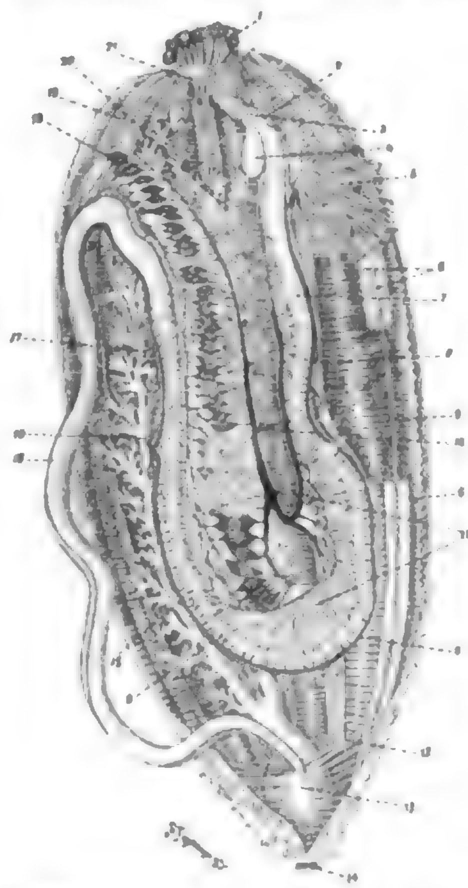


Fig. 8. Holothuria tubulosa. Organisation. Das Blutgefäßsystem schwarz. 1 Mundtentakel, 2 Steinkanäle, 3 Wassergefäßring, 4 Polische Blase, 5 Gonade, 6 Längsmuskeln, 7 vorderer Darmschenkel, 8 ventrales Darmgefäß, 9 radiales Wassergefäß, 10 Gefäßanastomose, 11 dorsales Darmgefäß, 12 Fäden und Stränge (muskulöser und bindegewebiger Natur), welche die Kloake an der Leibeswand befestigen, 13 Kloake, 14 Kloakenöffnung (Anus), 15 mittlerer Darmschenkel, 16 hinterer Darmschenkel. 17 rechter Kiemenbaum, 18 Wundernetze, 19 Radialkanal des Wassergefäßsystems, 20 linker Kiemenbaum, 21 Fühlerampullen. Nach Milne Edwards und Carus. Aus Lang.

sche Organe (stb) und fünf interradiäre oder Zahnblasen. Ob es sich auch hier um Kiemen handelt, ist sehr fraglich.

Auch dem Wassergefäßsystem kommt vielleicht eine indirekt respiratorische Tätigkeit zu, indem z. B. die Ambulacralfüßchen für den Gasaustausch in Betracht kommen könnten. In ihnen findet eine Flüssigkeitsströmung durch Wimperbewegung statt. Auch den dorsal gelegenen zarten Pedicellen wurde schon von Joh. Müller eine ähnliche respiratorische Funktion zugeschrieben. Nach Perrier spielt auch die Darmatmung eine große Rolle.

Die einzigen Echinodermen, die ein ausschließlich der Respiration dienendes Organ besitzen, sind die Holothurioideen, die sogenannte Wasserlungen haben. Der erste, der ihre Funktion erkannt hat, war Tiedemann, und auch neuere physiologische Untersuchungen haben diese Angaben bestätigt. Die Wasserlungen (Fig. 8, 17 u. 2C) sind zwei baumförmig verästelte starkwandige Kanäle, die rechts und links in der Leibeshöhle liegen und in den vorderen Teil der Kloake einmünden. Die Einmündung geschieht entweder gesondert oder vermittels eines Hauptstammes, der durch Kombination beider zustande kommt. Die Endzweige der Kiemenbäume enden in bläschenförmigen Erweiterungen, die als Ampullen bezeichnet werden. Die Kiemenbäume erstrecken sich in der Leibeshöhle bis ganz nach vorn und sind durch Muskeln und Bindegewebsfäden mit den benachbarten Organen verbunden. Die Wand der Wasserlungen besteht aus einem inneren flachen Epithel, einer dünnen Bindegewebsschicht, einer mehr oder weniger deutlich in Längs- oder Ringfasern gesonderten Muskelschicht und endlich aus dem bewimperten Epithel der Leibeshöhle. Der Atmungsprozeß ist ein rhythmischer. Nach regelmäßigen Pausen strömt Wasser durch die Kloake in die Wasserlunge ein. Von Zeit zu Zeit wird es wieder, vermischt mit Fäkalmassen, durch den After ausgestoßen.

3c) Mollusken. Die Respirationsorgane der Mollusken schließen sich ebenfalls eng an das Ektoderm, also die Haut, an. Auch hier weisen noch manche Formen rein diffuse Hautatmung auf, im allgemeinen sind aber wohl charakterisierte Kiemen vorhanden, die in ihrer ursprünglichen Form als Ctenidien bezeichnet werden. Ursprünglich waren diese Ctenidien (Fig. 9A) paarig angeordnete zweizeilig gefiederte und bewimperte Fortsätze der Leibeswand. Sie ragten vom Rumpf aus in die Mantelhöhle vor, wo sie geschützt waren. Zuführende Gefäße (Arterien) leiten das venöse Blut in sie hinein und Kiemenvenen führen wieder das arteriell gemachte Blut ab. An der Basis jedes Ctenidiums ist ein Sinnesorgan, das Osphradium, gelegen. Bei vielen Opisthobranchiern fehlt das Ctenidium, es wird durch ein neu auftretendes Organ ersetzt, das aber morphologisch nichts mit der Mantelkieme zu tun hat.

Paarig symmetrische Ctenidien sind nur bei ursprünglichen Formen (Chitoniden Fig. 9), vorhanden, ferner bei allen Mollusken, die die Symmetrie beibehalten haben (Lamelli-

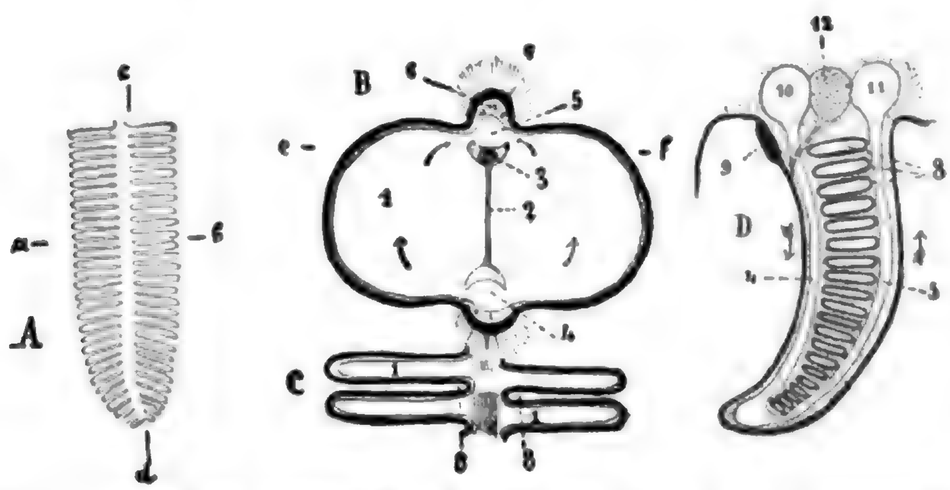


Fig. 9. Chiton. Bau eines Ctenidiums. A Einzelkieme mit den zweizeilig angeordneten Kiemenblättchen, B Querschnitt der Kieme in der Richtung a—b in Fig. A, 1 schmaler Blutraum in den Kiemenblättchen, 2 Scheidewand in der Achse, 3 Längsmuskel, 4 zuführendes Kiemengefäß, 5 abführendes Kiemengefäß, 6 Nerven, 7 lange Cilien auf der Kiemenachse, C 2 Paar Kiemenblättchen, senkrecht auf ihre Fläche in der Richtung e—f der Fig. B durchschnitten, horizontal, mit Bezug auf die Einzelkiemen, 1 wie in Fig. B, 8 Zwischenraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kiemenblättchen, D Längsschnitt durch die Kieme, etwas seitlich von der Achse, parallel zu ihrer Scheidewand in der Richtung c—d der Fig. A. Der Schnitt ist ein Teilstück eines Querschnitts durch den Körper. Bezeichnungen wie in Fig. B und C außerdem: 9 Riechwulst des Kiemenepithels, 10 allgemeines zuführendes, 11 allgemeines abführendes Kiemengefäß, 12 Pleurovisceralstrang des Nervensystems. Das Kiemenepithel ist überall durch eine schwarze Konturlinie angedeutet. Nach B. Haller.

branchier und Cephalopoden). Auch bei der ursprünglichen Gastropodenform der Cygobranchier sind noch zwei Ctenidien vorhanden, jedoch ist hier rechts und links vertauscht. Ob ursprünglich nur ein Ctenidienpaar vorhanden war oder ob mehrere hintereinander gelegene zuerst existierten, muß dahingestellt bleiben. Für die letztere Ansicht spricht, daß bei Chiton mehrere hintereinander liegen und daß auch bei Nautilus, einem primitiven Cephalopoden, vier Kiemen vorhanden sind. Bei allen übrigen Mollusken mit paarigen Ctenidien, und das spricht für die erste Ansicht, ist nur ein Paar vorhanden, das hinten am Körper liegt. Auch bei der Stammform der Prosobranchier ist die Kieme zuerst in der hinten im Körper liegenden Mantelhöhle anzunehmen, die sich dann mit den Kiemen nach vorne verlagert hat. Bei der großen Mehrzahl der Prosobranchier jedoch prägt sich die Asymmetrie des Körpers schon in der Kieme aus. Bei den Fisurelliden und Haliotiden ist nur die linke erhalten. Bei einem Teil der Opisthobranchier (Tectibranchier) ist noch ein Ctenidium an der rechten Seite des Körpers vorhanden, die übrigen haben mit der Mantelhöhle auch die echten Ctenidien verloren. Dafür sind dann adoptive Kiemen entstanden, die den anderen analog sind. Mannigfach verschieden gebaute Ctenidien zeigt Figur 10, A bis E.

Bei den Pulmonaten sind die Kiemen durch die Anpassung an die Luftatmung verloren gegangen. Es sind nur noch einige wenige Formen bekannt, die noch Kiemen besitzen. Da von den Ctenidien das arteriell gemachte Blut sofort in die Vorkammer des Herzens strömt, so ist es erklärlich, daß wichtige Beziehungen zwischen Ctenidien und Vorhöfen vorhanden sind. Als Regel kann gelten, daß paarigen Kiemen auch paarige Vorkammern und unpaaren Kiemen auch unpaare Vorkammern entsprechen. Bei Nautilus sind zwei rechte und zwei linke Vorkammern vorhanden, zu denen auch vier Ctenidien gehören. Die Chitonen dagegen haben trotz zahlreicher Kiemenpaare nur eine rechte und eine linke Vorkammer.

Die Scaphopoden haben weder echte Ctenidien noch lokalisierte Kiemen. Die Atmung wird durch die Haut besorgt und vielleicht auch durch den Enddarm unterstützt. Ebenso haben einige Nudibranchier und parasitische Entoconchen eine diffuse Hautatmung. Die Kiemen sind hier sekundär rückgebildet worden.

Die Grundform der Kieme ist etwa so gebaut wie die der Chitonen (Fig. 9), von der sich ja alle ableiten lassen. Es ist eine Achse mit einem zuführenden Gefäß vorhanden, von welcher nach beiden Seiten Kiemenblättchen abgehen. Letztere schließen einen flachen Bluthohlraum ein, aus dem das Blut in das der Kiemenachse gegenüberliegende, das Blut abführende Kiemengefäß gelangt. Von dieser Grundform treten die mannigfachsten Modifikationen (Fig. 10, A bis E) auf, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

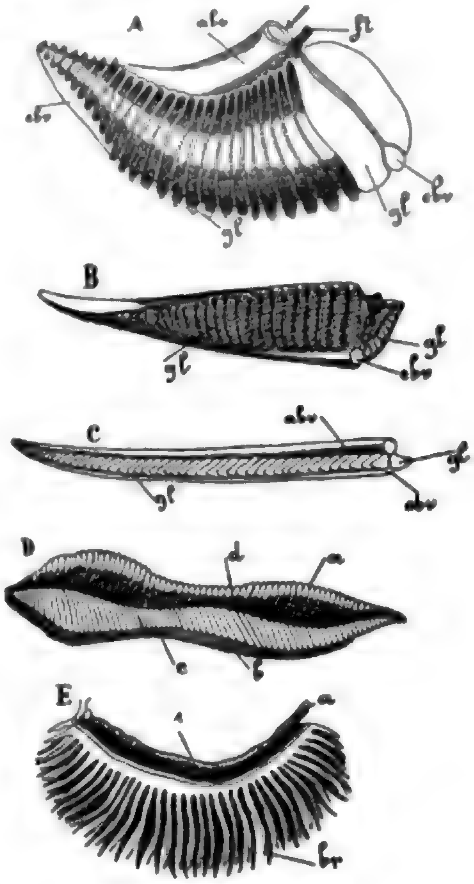


Fig. 10. Verschiedene Mollusken. Ctenidien. A Chiton. B Sepia. C Fissurella. D Nucula. E Paludina. ft Kiemenlängsmuskel, abv zuführendes Kiemengefäß, ebv abführendes Kiemengefäß (Kiemenvene), gl paarige Lamellen (Blättchen) der zweizeilig gefiederten Kieme; in D bedeutet: d Lage der Achse, a innere, b und c äußere Reihe von Kiemenlamellen; in E bedeutet: i Enddarm, br Kiemenfäden a Anus. Nach Ray-Lankester. Aus der Encyclopaedia britannica.

Die Lamellibranchiaten zeigen sehr hoch differenzierte, aber symmetrische Kiemen. Sie liegen an jeder Seite des Fußes im Mantelraum und scheinen an jeder Seite in der Zweizahl vorhanden zu sein. Diese zwei Kiemen sind nun aber weiter nichts als die zwei Reihen von Kiemenblättchen eines zweizeilig gefiederten Ctenidiums. Diese Umwandlungsprozesse kann man Schritt für Schritt verfolgen (Fig. 11, A bis D). Bei den ursprünglich organisierten Protobranchiern (Fig. 11, A) sind noch zwei fiederförmige Kiemen vorhanden, die mit zwei Reihen von Blättchen versehen sind und eine Achse mit zu- und abführendem Gefäß besitzen. Sie

konvergieren nach hinten und ragen mit ihrer freien zipfelförmigen Spitze in die Mantelhöhle vor. Am unteren Rande eines jeden Kiemenblättchens laufen von der Achse bis zur Spitze zwei bindegewebige oder chitinöse Stäbchen, die als Stütze dienen. Aehnliche Stützstäbchen sind bei fast allen Lamellibranchiaten vorhanden. An einer Reihe von

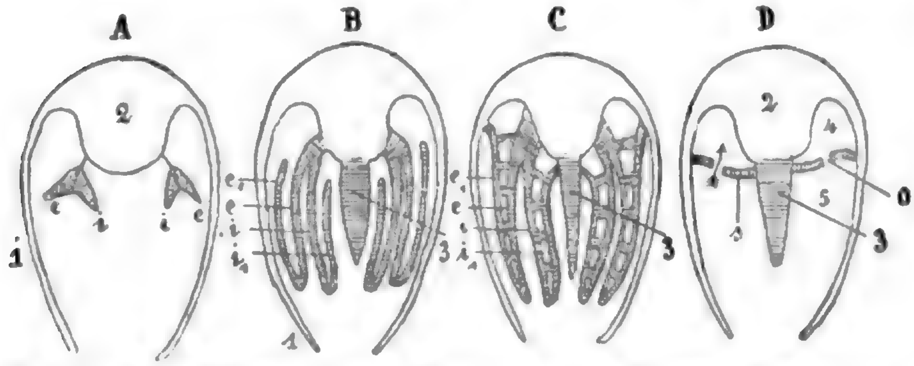


Fig. 11. Lamellibranchier. Morphologie der Kieme. Schematische Querschnitte. A Protobranchia. B Filibranchia. C Eulamellibranchia. D Septibranchia. 1 Mantel, 2 Rumpf (Eingeweidesack), 3 Fuß, e in A Kiemenblättchen der äußeren Reihe der zweizeilig gefiederten Kieme, in B Kiemenfäden der äußeren Reihe, in C äußeres Kiemenblatt, i Kiemenblättchen, resp. Kiemenfaden der inneren Reihe, resp. inneres Kiemenblatt, e_1 aufsteigender Ast, resp. Lamelle des äußeren Kiemenfadens, resp. Kiemenblatt. In D bedeutet s die zu einem muskulösen Septum umgewandelte Kieme, welche die Mantelhöhle in eine obere (4) und in eine untere Etage (5) teilt, die miteinander durch Spalten (o) in der Scheidewand kommunizieren. Nach A. Lang.

scharf umgrenzten Stellen, am ventralen Rand, an den vorderen und hinteren Flächen, nahe dem ventralen Rande ist das Epithel mit langen Cilien bedeckt. Die mit Cilien bedeckten ventralen Ränder einer jeden Blättchenreihe bilden also mit Rücksicht auf die ganze Kieme je eine Längsreihe von Cilien an der freien ventralen Kante, wodurch ein Wasserstrom von hinten nach vorn erzeugt wird. Die Cilien der vorderen und hinteren Flächen greifen wie Bürsten ineinander und stellen eine lockere Verbindung der Blättchen einer Reihe her. Aus diesen Protobranchierkiemen sind nun die der Filibranchier (Fig. 11 B) so abzuleiten, daß die Blättchen stark in die Länge wachsen und so zu Kiemenfäden werden, die weit in die Mantelhöhle hineinhängen. Dadurch ferner, daß sie aus sich selbst zurück geknickt werden, entsteht ein auf- und absteigender Schenkel. Indem nun jeweilig diese auf- und absteigenden Schenkel sich sehr nahe aneinander legen, entstehen zwei dicht aneinanderliegende Kiemenlamellen. Die Verbindung der einzelnen Fäden zu Lamellen wird durch außerordentlich stark ausgeprägte Cilienbürsten bedingt.

Allmählich verwachsen nun die Kiemenfäden miteinander und jedes so entstandene Blatt wird zum Zweck weiterer Oberflächenvergrößerung vielfach in der Längsrichtung der Fäden gefaltet, die jetzt annähernd dorsoventral liegen. So kommt der Typus der Pseudolamellibranchier zustande. Bei den Eulamellibranchiern (Fig. 11 C) sind die Kiemenblätter entweder glatt oder gefaltet. Hier sind nicht nur die auf- und absteigenden Lamellen desselben Blattes, sondern auch die aufeinanderfolgenden Kiemenfäden eines Blattes (Fig. 12 lrf) durch vaskularisierende Brücken in organische Verbindung gebracht. Durch diese interfoliären und interfilamentären Verbindungsbrücken ist der ursprüngliche filamentäre Bau stark verwischt. Es ist so ein wirkliches Blatt entstanden, das an beiden Flächen Löcher und Spalten besitzt, die in ein Lücken- oder Kanalsystem im Inneren führen. Die zu- und abführenden Blutwege befinden sich jetzt in den Balken-

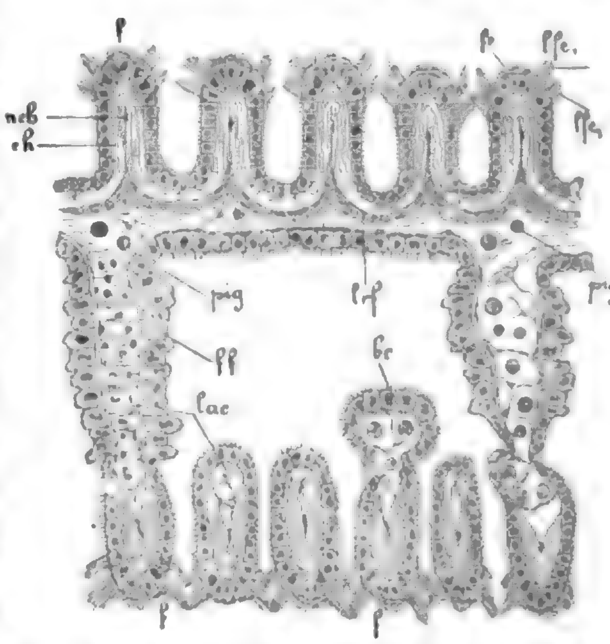


Fig. 12. Dreissensia polymorpha. Stück eines Querschnittes durch das äußere Kiemenblatt. f Die einzelnen Kiemenfäden, ff subepitheliale Fasern, ch Stützsubstanz der Fäden, lac Lacunengewebe, pig Pigmentzellen, bc Blutkörperchen, fe Epithelium des freien Randes der Kiemenfäden, welche Cilien (Cilienbürste) tragen), lrf Gewebe der interfilamentären Verbindungsbrücken. Es sind zwei interfoliäre Verbindungsbrücken getroffen. Nach Peck, 1877.

netzen. Die scheinbar hier vorhandenen vier Kiemen sind also in Wirklichkeit nur zwei. An den Blättern sind noch mannigfache Modifikationen möglich, so kann z. B. die aufsteigende Lamelle des äußeren Blattes oder das ganze äußere Blatt fehlen, es können ferner Verwachsungen von Kiemen und Mantel eintreten.

Beide inneren Kiemen können nun im Bereich des Fußes mit diesem verschmelzen. Hinten, wo der Fuß aufhört, verwachsen sie dann in der Mittellinie der Mantelhöhle miteinander, sie bilden so eine Scheidewand, welche, indem sie sich mit der von der Mantelhöhle gebildeten Scheidewand zwischen aus- und einströmendem Sipho verbindet, die Mantelhöhle in eine obere und untere Abteilung trennen (Fig. 13). Durch die untere

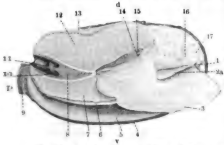


Fig. 13. Anodonta mutabilis. Präparat zur Darstellung der Verhältnisse der Mantelhöhle. Die rechte Schalenklappe und die rechte Mantelhälfte sind entfernt, die Kiemenblätter der rechten Seite nach oben emporgeschlagen. Die Verwachsungsstelle der aufsteigenden Lamellen der inneren Kiemenblätter ist durchtrennt (gestrichelte Linien), um einen Einblick in die Kloakenhöhle und den inneren Kiemengang zu gewähren, ebenso ist die Verwachsung der aufsteigenden Lamelle des rechten inneren Kiemenblattes mit dem Fuße eine Strecke weit durchtrennt, um die Nieren- und Geschlechtsöffnung zu zeigen. a vorn, p hinten, d oben, o unten, 1 Mund, 2 Mundlappen, 3 Fuß, 4 linke Schalenklappe, 5 linke Mantelhälfte, 6 äußeres Blatt der linken Kieme, 7 inneres Blatt der linken Kieme, 8 innerer Kiemengang (basaler Gang zwischen den beiden Lamellen des inneren Kiemenblattes jederseits, in der Fußgegend paarig, hinter dem Fuße unpaar), 9 Papillen, welche die Einströmungsöffnung umstellen, 10 Mündung des äußeren Kiemenganges (des basalen Ganges zwischen den beiden Lamellen des äußeren Kiemenblattes, jederseits paarig), 11 After, 12 inneres Blatt der rechten Kieme, 13 äußeres Blatt der rechten Kieme, 14 Geschlechtsöffnung, 15 Nierenöffnung, 16 Cerebralganglion, 17 vorderer Schließmuskel. Nach Hatschek und Cori.

Abteilung, den Einströmungssipho, strömt Wasser in die große untere Mantelhöhle, umspült die Kiemen, geht dann nach vorn und gibt die mitgebrachten Nahrungsbestandteile an den Mund ab. Der Strom fließt darauf jederseits vom Fuße in die obere Mantelhöhle, die durch die Ansatzstelle der Kieme in zwei Kanäle geteilt wird. Das Atemwasser geht dann durch den oberen Ausströmungssipho wieder nach außen.

Die stärksten Abweichungen zeigen die Septibranchier (Fig. 11 D), wo die Kiemenscheidewand in ein muskulöses Septum umgewandelt ist. Die Kieme verläuft in horizontaler Richtung quer durch die Mantelhöhle und schließt sich hinten an das Siphonalseptum an. Das Septum ist von Falten und Löchern durchbrochen, so daß eine Kommunikation der oberen und unteren Abteilung hergestellt wird.

Die Kiemen der Cephalopoden (Fig. 14)

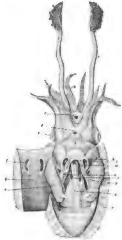


Fig. 14. Sepia Savignyana. Von hinten. Der Mantel zum größten Teil aufgeschnitten und auf die rechte Seite (links in der Figur) zurückgeklappt. a Fangtentakel, b Mundarme, c Mund mit Kiefern, d untere Trichteröffnung, e Auge, f Mundschließknorpel am Mantel g, h rechtes Ctenidium, i Trichter, k Mantelschließknorpel am Eingeweidesack, l obere Trichteröffnung, m After, n Depressor infundibuli, o Penis, p rechte Nephridialöffnung, q hinteres Integument des Eingeweidesackes, r Flosse. Nach Savigny, Description de l'Egypte.

sind noch typisch zweizeilig gefiedert. Sie liegen in der Kiemenhöhle, rechts und links vom After. Die Arterie liegt dorsal im Kiemenblatte, die Vene ventral. Die Wände der Kiemenblätter sind zum Zweck größerer Respirationsflächen in Falten gelegt. Auf

die weiteren Modifikationen kann hier nicht eingegangen werden. Bei den Cephalopoden ist das Wimperkleid, welches bei den Lamellibranchiaten z. B. allein den Atemstrom erzeugt, rückgebildet. Der gut ausgebildete Mantel genügt als wirksames Organ der Atemmechanik.

Bei den meist landlebenden Pulmonaten ist mit Ausnahme einiger Basommatophoren ein Verfall der Ctenidien eingetreten. Die Mantelhöhle selbst ist hier zum Respirationsorgan, zur Lunge, geworden. Sie liegt vorn und seitlich vom Eingeweidesack und ist mit einem Spiraculum zur Luftaufnahme und -Entleerung versehen. An der Decke der Mantelhöhle liegt ein respiratorisches Gefäßnetz (Fig. 15), das aus einer

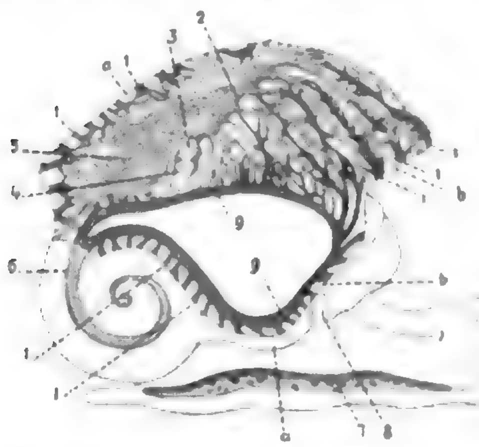


Fig. 15. Helix pom. Lungendecke. Dem Rectum und ihrem mit dem Nacken verwachsenen Rand entlang durchschnitten und zurückgeklappt. Zur Demonstration des Blutgefäßsystems. Die Lungenvenen sind hell, die zuführenden Lungengefäße und venösen Sinusse dunkel gehalten. aa, bb zusammengehörige Schnittränder. 1 zuführende Lungengefäße, welche ihr (venöses) Blut aus dem großen venösen Ringsinus 9 beziehen. Dieser letztere erhält sein Blut aus den großen Körpersinussen, von denen der des Eingeweidesackes 6 und der rechte Fußsinus 7 dargestellt sind. Die abführenden Lungengefäße sammeln das an der Lungendecke arteriell gewordene Blut und führen es durch die Lungenvene 2 zum Vorhof 3 des Herzens, 4 Herzkammer, 5 Nierenkreislauf, 8 Atemloch. Nach Howes.

Ringvene am Mantelwulst besteht, von der aus fein verteilte anastomosierende Gefäße ausgehen. Diese treten wieder zu einem großen Stamme zusammen, der parallel dem Rektum verläuft und in den Vorhof einmündet. Es ist dieses die Lungenvene, die arterielles Blut führt, während die Ringvene venöses Blut enthält. Einige Pulmonaten haben sich sekundär wieder an das Wasser angepaßt (Limnaeiden), die Atmung ist jedoch eine Luftatmung geblieben. Bei manchen Pulmonaten hat die Rückkehr zur Atmung im Wasser wieder zu Kiemen geführt (Planorbis, Siphonarien). Die Fähigkeit zur Luftatmung ist hier zum Teil wieder vollständig verloren gegangen. Manche Formen haben sich auch die Fähigkeit zur Luftatmung bewahrt und sind so zu Doppeltatmern geworden. Zu diesen gehören auch die amphibisch lebenden Ampularier, die unter Wasser nur die Kiemen, bei Ausflügen an Land nur die Lungen verwenden. Es sind also interessanterweise alle Uebergänge von der Wasser- zur Landatmung bei den Gastropoden vorhanden.

3d) Arthropoden. *α*) Crustaceen. Wenn wir nun zu den Atmungsorganen der Arthropoden übergehen, so zeigen die Crustaceen manche Anklänge an die Mollusken darin, daß sie typische Wasseratmer sind, aber dennoch auch befähigt sind, ihre an das Wasser angepaßten Organe für die Luft umzubilden. Ihre Respirationsorgane sind eng an die Gliedmaßen geknüpft und sehr variabel. Wir haben es also auch hier mit ektodermalen Hautorganen zu tun. Dasselbe gilt auch für die Tracheaten, jedoch sind hier die Atmungsorgane in Form von Röhren, die Tracheen, in das Innere des Körpers verlagert, was bei allen luftatmenden Tieren wiederkehrt.

Es sei zunächst kurz auf die Atmungsorgane der Crustaceen eingegangen. Auch hier ist noch eine diffuse Hautatmung bei manchen Formen zu konstatieren, die aber meist sehr klein sind und ein sehr zartes Integument besitzen. Die Hautatmung geht meist einher mit einer sehr rudimentären Beschaffenheit des Zirkulationssystems. Meist aber wird auch hier schon die respiratorische Oberfläche durch Hautduplikaturen und Anhänge vergrößert, wodurch der Uebergang zu den eigentlichen Atmungsorganen gegeben ist. Auch die Beteiligung des Darmes ist bei den Crustaceen nicht ganz auszuschließen.

Eigenartigerweise sind die Atmungsorgane der Crustaceen fast nur an den Extremitäten lokalisiert, was vielleicht seinen Grund darin hat, daß diese noch am ehesten eine Erneuerung des Atemwassers herbeizuführen imstande sind. Namentlich wenn einige Extremitätenpaare ausschließlich ihre Lokomotion in den Dienst der Respiration stellen. Die Ausbildung der Kiemen ist außerordentlich verschieden (Fig. 16). Die einfachsten sind die lamellösen bei den Branchiopoden oder die schlauchförmigen bei Amphipoden. Sehr komplizierte Kiemen von sehr ansehnlicher respiratorischer Oberfläche finden wir bei den Stomatopoden und Decapoden. Manche Schizopoden zeigen manchmal sogar alle Uebergänge von den einfachsten bis zu den kompliziertesten Formen bei ein und demselben Individuum. Bei ihnen nehmen die von den Brustfüßen aus-

gehenden Kiemen von vorn nach hinten an Umfang und Reichhaltigkeit zu (Fig. 16).

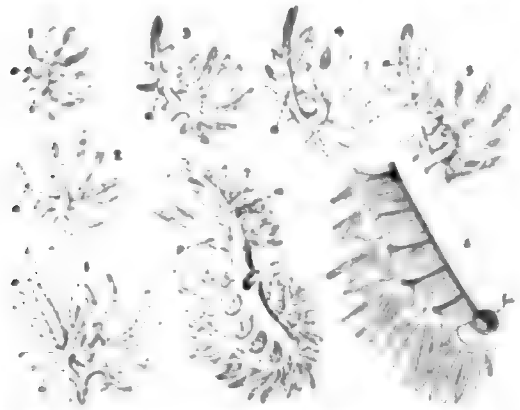


Fig. 16. Thysanopoda tricuspidata M.-Edw. 1 bis 7 Kiemen des 1. bis 7. Beinpaares. a der sich an jeder folgenden Kieme reicher entfaltende Seitenast. p (in 7) Rudiment des 7. Beinpaares. Nach Sars. Aus Ortmann. 8 Kiemen der 6 vorderen Beinpaare von Stylocheiron carinatum Sars. lu am 6. Beinpaar ein Leuchtorgan. Nach Sars. Aus Ortmann.

Besonders charakteristisch sind die Kiemen der Decapoden entwickelt. Bei ihnen liegen die Kiemen in einem Atemraum (Fig. 17), der von den Seitenteilen des Kopf-Brustschildes, dem Kiemendeckel, gebildet wird. Der Kiemendeckel reicht ventralwärts bis an die Insertionsstelle der Brustfüße, wo der Atemraum jederseits durch eine Längsspalte mit dem Atemmedium kommuniziert. Ihrer Struktur nach lassen sich die Kiemen der Decapoden in zwei Hauptformen teilen, in die Phyllobranchien, bei welchen von einem medianen, der Blutzufuhr dienenden Schaft zweizeilige, dicht aneinanderliegende Lamellen hervorgehen und in die Trichobranchien, wo von dem gemeinsamen Schaft in mehreren Richtungen dünne Schläuche sich abzweigen. Bei den ersteren ist das obere und untere Blatt der Lamelle durch ein maschenartiges Netzwerk verbunden, zwischen welchem das Blut zirkuliert. Bei letzteren teilt eine zarte mittlere Scheidewand jeden Schlauch in zwei Röhren von gleichfalls cavernöser Struktur.

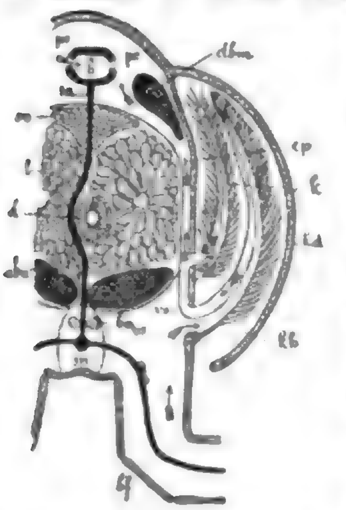


Fig. 17. Flußkrebs. Querschnitt durch den Cephalothorax in der Gegend des Herzens. Schematisch. kd Kiemendeckel, k Kiemen, kh Atem- oder Kiemenhöhle, cp Seitenwand des Cephalothorax, pc Pericard, h Herz, sa Sternarterie, l Hepatopancreas, d Darm, abm ventrale Längsmuskeln zum Abdomen, dbm dorsale Längsmuskeln zum Abdomen, bm Bauchmark, sn Subneuralgefäß, bf Gehfuß, vs ventraler Sinus, ov Ovarium. Die Pfeile geben die Richtung des Blutstromes an. Nach Huxley und Plateau.

Viele Crustaceen haben die Fähigkeit erlangt, längere Zeit auch in der Luft leben zu können, ohne daß ihre Kiemen entsprechende Modifikationen erkennen lassen (Balanus, Orchestiiden). Voraussetzung für dieses zeitweilige Landleben ist, daß die Kiemen nicht austrocknen. Es müssen daher solche Krebse besonders für das Landleben sich eignen, die einen abgeschlossenen Kiemenraum besitzen, wie das z. B. unter den Decapoden bei den Brachyuren (Fig. 18) der Fall

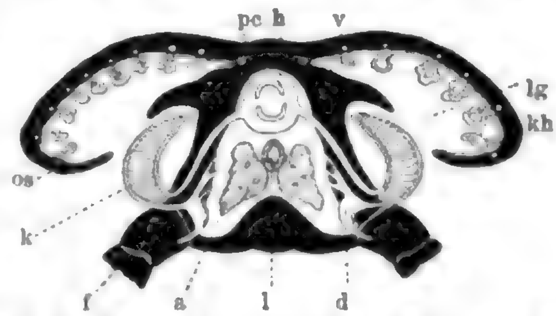


Fig. 18. Brachyure. Querschnitt in der Herzgegend, mit Einreihung der Verhältnisse der Lunge von Birgus. Schematisch. h Herz, pc venöser Pericardsinus, k Kieme, os Thoracum, lg Lungenbüschel, v Kiemenvene, a Kiemenarterie, d Darm, l Leber, f Fuß. Nach C. Semper.

ist. Die Kiemenhöhle ist nun am vorderen Ende des Kiemenraumes offen und so kommt es, daß die Krabben sich lange Zeit während der Ebbe am Strande herumtreiben können, ohne daß ein Eintrocknen ihrer Kiemen erfolgt. Diese Einrichtung hat die Grundlage abgegeben für weitergehende Umbildungen. Manche Krabbengattungen haben sich nämlich vollständig an das Landleben angepaßt und gehen nur noch zur Ablage ihrer Eier in das Wasser. In einigen Fällen erfolgt die Atmung noch so, daß das im Kiemenraum zurückgebliebene Wasser mit Sauerstoff durchsättigt wird. In den meisten Fällen ist aber die Kiemenhöhle durch starke Auftreibung (Fig. 18) vergrößert, an der Decke entstehen blutgefäßreiche Wucherungen, die den Gasaustausch mit der aufgenommenen Luft vermitteln, wie es z. B. bei Birgus, dem Palmendieb, der Fall ist. Die Kiemen können schließlich vollkommen funktionslos werden, so daß die Tiere, wenn man sie zwingt im Wasser zu atmen, ersticken. Im Grunde genommen sind hier also dieselben Umwandlungsprozesse eingetreten, wie bei den Pulmonaten, wo auch der Mantelraum zum Atmungsorgan wird.

Auch eine Gruppe der Isopoden, die Landasseln oder Onisciden, haben sich an das Leben auf dem Lande und damit auch an die Luftatmung angepaßt. Die weniger

angepaßten Formen sind auch auf dem Lande noch auf die Atmung vermittels ihrer Kiemen angewiesen, es sind das die von den Außenästen zum Schutz überdeckten Innenäste der Hinterleibsextremitäten. Diese Tiere können nur in sehr feuchter Luft leben. Viele Landasseln aber, z. B. Porcellio und Armadillidium, haben besondere Einrichtungen für die Luftatmung gewonnen. Es sind dieses die sogenannten weißen Körper, die in den äußeren Aesten der Spaltfüße, entweder in allen oder nur in den vordersten untergebracht sind. Diese Gebilde bestehen aus tracheenartigen Lufträumen, die vom Blut umströmt werden (Fig. 19). Nach den Untersuchungen von Stoller bestehen sie bei Porcellio scaber aus einem größeren flachen und einem kleineren ausgebauchten Teil (Fig. 19). Der erstere ist ebenso gebaut wie auch sonst die Kiemenblättchen, bei letzterem jedoch ist ein mächtiger Blutraum vorhanden, der durch verästelte Luftkanäle in zahlreiche Lakunen zerteilt ist. Durch diese Entwickelung der Atmungsflächen nach innen ist die Gefahr des Austrocknens sehr vermindert und die Asseln können jetzt in mäßig feuchter Luft lange Zeit leben.

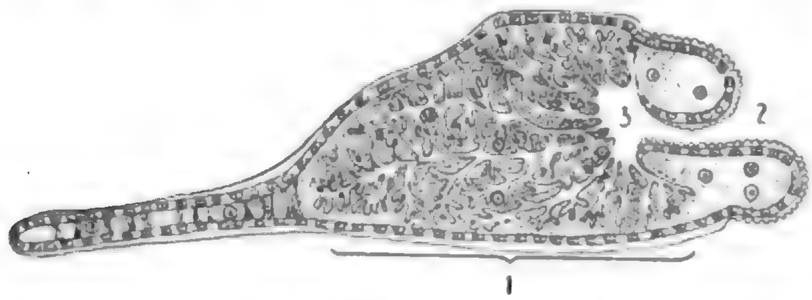


Fig. 19. Kellerassel (Porcellio scaber Latr.). Querschnitt durch den Außenast des 1. Abdominalbeines. 1 weißer Körper, 2 Atemöffnung, 3 Luftraum, von dem die verästelten Röhrchen abgehen. Die Bluträume sind punktiert, in ihnen Blutkörperchen. Nach Stoller.

β) Kiemen der Xiphosuren und die Lungenbücher oder Fächertracheen. Eine besondere Besprechung bedürfen noch die Kiemen der Xiphosuren. Es sind hier äußere Kiemen vorhanden, die an der hinteren Fläche des Exopodits der Extremitäten des 11. bis 15. Segments gelegen sind. Diese kiementragenden Beinpaare sind lamellenartig gestaltet. Jede Kieme besteht aus einer Reihe von Blättern, die wie die Seiten eines Buches aneinander gelegt sind. Ihre Zahl beträgt 150 bis 200. Die Kiemenblätter entstehen an der hinteren dorsalwärts gerichteten Seite des 2. bis 5. Abdominalextremitätenpaares und zwar als einfache Ausstülpungen der Körperoberfläche. Anfangs wurden sie nur in geringer Zahl angelegt, jedoch treten mit der fortschreitenden Entwickelung immer neue Anlagen von Kiemenlamellen an dem Basalabschnitt der betreffenden Extremitäten hinzu. Nach Kingsley ist bemerkenswert, daß die jungen Stadien der Entwickelung des Kiemenbuches ein wenig unter die Oberfläche eingesunken erscheinen (Fig. 20 k), was für den Vergleich der ähnlich gebauten und angelegten Skorpion- (vgl. Fig. 21) und Spinnenlunge, die vollständig in den Körper hinein versenkt wurde, von Bedeutung ist. Da die einzelnen Blätter aus Ausstülpungen entstanden sind, so ist ihr Bau ohne weiteres verständlich. Jedes Blatt besteht aus zwei zarten chitinösen Lamellen, die innen vom Körperepithel ausgekleidet sind und komplizierte Bluträume zwischen sich einschließen. Zwischen den einzelnen Blättern der Kiemen zirkuliert nun das Atemwasser. Durch einen besonderen Mechanismus können die Lamellen jedes Blattes einander genähert und auseinander gespreizt werden, so daß ständig neues Blut in die Kiemen hineinkommt und so wieder mit Sauerstoff angereichert werden kann. Die Lamellen sind außerdem von außen noch mit Wimperhaaren bekleidet, die ein Berühren der aneinander gelagerten Kiemenblätter verhüten. Die Erneuerung des Atemwassers wird durch Hin- und Herschlagen der kiementragenden Extremitätenanhänge bewirkt. Bemerkenswert ist, daß auch die Xiphosuren wochenlang am Lande leben können, wenn sie



Fig. 20. Limulus. Längsschnitt durch die Abdominalanhänge eines Embryos. Zur Darstellung der Entstehungsweise der Kiemenlamellen. ga_1, ga_2 erstes und zweites kiementragendes Beinpaar, o Operculum, k Kiemenblätter, m Muskeln, d Nahrungsdotter. Nach Kingsley.

nicht gar zu sehr durch die Sonnenbestrahlung austrocknen.

Ganz ähnlich gebaute Respirationsorgane besitzen nun die Skorpione, die vier Paar Lungen an der Unterseite des dritten, vierten, fünften und sechsten Segments aufweisen. Auch bei den Spinnen kommen derartige Tracheenlungen vor, jedoch sind hier auch echte Tracheen vorhanden, auf die später eingegangen werden soll. Nach den Untersuchungen von Brauer leiten sich die Lungen der Skorpione direkt von kiemenartigen Gebilden her, die aus abdominalen Extremitätenanlagen entstehen, in derselben Weise wie das für Limulus angedeutet wurde (Fig. 21 l). Schon Ray Lankester und

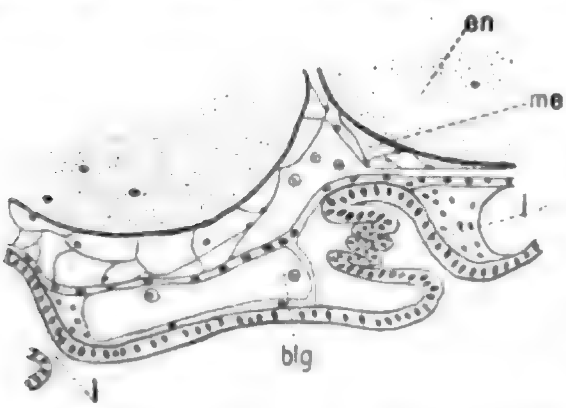


Fig. 21. Euscorpionus carpathicus. Längsschnitt durch die Anlage der Lunge eines Embryos. blg Blutgefäße, en Entoderm, l Lungeneinstülpung, me Mesoderm. Vergrößerung 184 fach. Nach A. Brauer.

nach ihm besonders Mac Leod waren der Ansicht, daß die Blätter des Kiemenbuches bei Limulus denen des Lungenbuches der Arachnoiden homolog seien. Nun sind allerdings die Lungenblätter bei den Arachnoiden in eine respiratorische Höhle des Körpers versenkt und stehen mit der Außenwelt nur durch ein Stigma in Verbindung, wie wir es bei der Tracheenatmung kennen. Wie aber die Entwickelung zeigt, wird diese Hineinverlagerung der Lungenbücher erst in der Embryonalzeit (s. Brauer) vollzogen. Auch bei Limulus ist schon an der Ventralseite eine den Kiemenblättern entsprechende Einbuchtung entstanden. Man braucht sich nun nur die einzelnen respiratorischen Gliedmaßenpaare weiter auseinandergerückt zu denken, als wie dieses bei Limulus der Fall ist und die Ränder der eben erwähnten Einbuchtung mit den Rändern der blattförmigen Extremität verwachsen zu lassen, so wird hierdurch ein abgeschlossener Raum, der Lungensack der Arachnoiden gebildet. Der freie hintere Rand der Extremität würde dann zum vorderen Rand des entsprechenden Stigmas. Durch diese Annahme, die namentlich Mac Leod vertritt, werden nun einige Einrichtungen der Kiemenlunge erst erklärbar, z. B. daß die Lungenblätter nicht nur an ihrem hinteren, sondern zum Teil auch an ihrem seitlichen Rande frei sind. Ferner, daß die entsprechenden Lungensäcke der beiden Seiten miteinander eine Verbindung haben. Durch zahlreiche andere Uebereinstimmungen in dem Bau und der Entwickelungsweise von Limulus und der Arachnoiden ist man jetzt geneigt, letztere aus den Paläostraken durch Anpassung an das Landleben abzuleiten.

Nach anderer Ansicht sind die Lungensäcke modifizierte Tracheenbüschel. Diese Ansicht hat schon Leuckart vertreten und sie ist von Bertkau und ganz neuerdings von B. Haller weiter ausgebaut worden. Danach sind die Lungensäcke zusammengesetzt aus bandförmig abgeplatteten Röhren, die des Spiralfadens, der sonst bei Tracheen gefunden wird, vollständig entbehren und büschelförmig von einem Hauptstamm ausgehen, der als Tracheenstamm aufzufassen ist und durch das Stigma nach außen mündet. Die Blätter des Lungensackes wären dann aus einem dem Hauptstamm aufsitzenden Tracheenbündel hervorgegangen. Vom vergleichend anatomischen Standpunkt hat diese Ansicht, wie das schon Lang betont und Haller näher ausführt, manches für sich. Namentlich da auf dem Wege der Ontogenese Schimkewitz und Jaworowski den Nachweis erbracht haben, daß wenigstens die Spinnenlunge aus Tracheen entsteht. Nach dem letzteren Autor besitzt die Spinnenlungenanlage, nachdem das Stigma sich gebildet, einen langen, wohl entfalteten Tracheenast, und nun erst beginnen sich in der Nähe des Stigmas die Lungenlamellen zu bilden, deren ursprüngliche Röhrennatur jedoch klar ist. Dem stehen jedoch die Angaben von Brauer beim Skorpion und die von Burcell, Kautsch, Hamburger u. a. bei den Spinnen gegenüber, wo die Lungenanlagen an der hinteren Seite der rudimentären Gliedmaßen gelegen sind. Die ektodermalen Einstülpungen falten sich dann weiter, wobei der Extremitätenstummel versenkt wird. Wir sehen also, daß die alte Ray Lankestersche Auffassung noch heute zu der Leuckartschen im Gegensatz steht und daß beide manches für und gegen sich haben.

Bei den Tracheenlungen der Arachnoiden führt das Stigma in einen gemeinsamen Luftraum (Fig. 22), der durch zahlreiche, gleich den Blättern eines Buches von der schmalen Wand ausgehenden Septen in vielfache lufterfüllte Fächer geteilt wird.

Die Septen bestehen wie bei Limulus aus zwei Chitinlamellen (Fig. 23), die einen mit Blut erfüllten Hohlraum zwischen sich einschließen. Die beiden Lamellen werden durch Querpfeiler

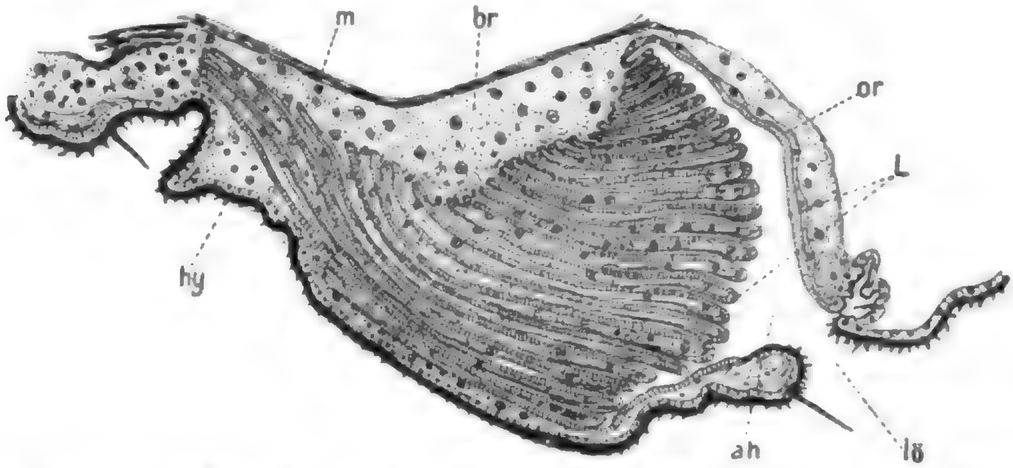


Fig. 22. Tegenaria. Sagittaler Längsschnitt durch die Lunge. Quer zu den Lungenblättern. L Lungenblätter, lö Lungenöffnung (Stigma), ah Atemhöhle, or deren hintere bezw. obere Wand. br Blutraum, m Spannmuskel, hy Hypodermis. Original.

zusammengehalten, die nach Mac Leod wahrscheinlich myoider Natur sind, nach Haller aber nur eine muskelähnliche Funktion haben. Ihre Funktion würde darin bestehen, durch Kontraktion oder Extraktion eine Verschmälerung oder Erweiterung der eingeschlossenen Bluträume und eine entsprechende Vergröße-

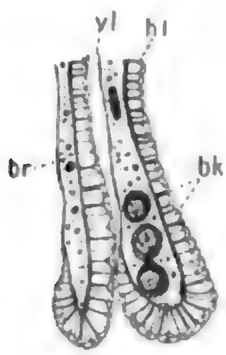


Fig. 23. Zwei freie in die Lungenhöhle vorragende Lungenblätter. Im Querschnitt. vl vordere, hl hintere Chitinlamelle, bk Blutkörperchen, br Blutraum. Original.

rung oder Verkleinerung der Luftfächer herbeizuführen. Sie würden also gleichzeitig für eine Ventilation der Lunge und für eine Bluterneuerung sorgen.

Börner beschreibt auch noch bei den Atmungsorganen der Pedipalpen Muskelfasern, welche teils von der Bauchplatte des Genitalsegments, teils von der Hinterwand des gemeinsamen Luftraumes zu den Vorderenden der Lungenfächer hinziehen und als Erweiterungsmuskeln der Atemräume fungieren sollen. Bei dem dargestellten Querschnitt eines Lungenbuches von Tegenaria (Fig. 22, m) ist dieser Muskel ebenfalls zu erkennen, auch Haller hat derartige Muskeln nachgewiesen. Die dorsalen Lamellen der Lungenblätter und die Vorderwand der gemeinsamen Luftkammer sind wie auch sonst bei vielen Arachnoiden mit zahllosen reich verzweigten Härchen besetzt (Fig. 24), die an ihrer Spitze bogenförmig miteinander verschmelzen und so ein schaumiges Gerüstwerk bilden, das den Zweck hat, ein Zusammenkleben der Blätter zu verhindern. Außerdem wird die Elastizität der einzelnen Blätter dadurch erhöht. Bei starkem Blutgehalt der Kiemenblätter sind die Härchen oft bis zur Hälfte ihrer sonstigen Höhe zusammengedrückt. Läßt der Blutdruck nach, so werden sie vermittels ihrer Elastizität wieder emporschnellen und so das Blut aus den Blättern heraustreiben helfen. Börner faßt diese Härchen als Luftverdichtungsapparate auf.

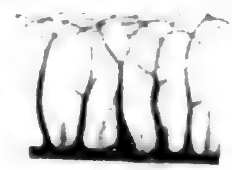


Fig. 24. Härchenbesatz der oberen Wand der Lungenhöhle bei stärkerer Vergrößerung. Original.

γ) Tracheaten. Während die Atmung durch Lungenbücher sich an die der Crustaceen anschließen läßt, stehen die durch Tracheen atmenden Tiere vollständig abseits. Das Prinzip ihrer Atmungsorgane liegt in der Ausbildung eines Systems gasführender Röhren, die sich außerordentlich fein in alle Teile des Körpers verzweigen und so den Gasaustausch der Gewebe entweder direkt oder unter Vermittlung des Blutes bewirken.

Die Tracheen entstehen aus paarigen, segmental angeordneten Ektodermeinstülpungen (Fig. 25 tr), welche lateralwärts von

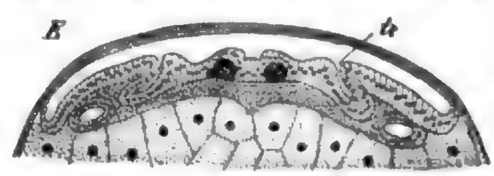


Fig. 25. Hydrophilus. Querschnitt durch den Keimstreif. Querschnitt durch älteres Stadium. tr Tracheenanlage. Nach Heider. Aus Langs Lehrbuch.

den Extremitätenanlagen gelegen sind. Aus dieser embryonalen Entstehung heraus ist auch ihr Bau ohne weiteres verständlich. Sie bestehen aus einer zelligen zylindrischen Schicht (Fig. 26 hy), der direkten Fortsetzung der Hypodermis. Nach innen zu scheiden

diese Zellen eine chitinöse Intima (cc) aus, wodurch sie wieder ihren hypodermalen Charakter dokumentieren. Auf dieser chitinösen Intima verläuft der sogenannte Spiralfaden, der jedoch nur den Hexapoden zukommt. Die Entstehung des Spiralfadens

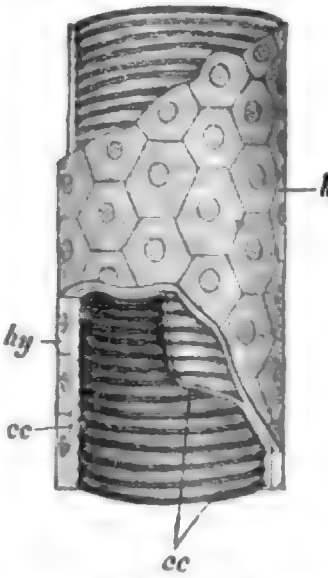


Fig. 26. Bau einer Trachee. Schematisch. Oben und unten ist ein Stück Epithel von der Trachee entfernt, unten ist ferner ein Stück der chitinigen Intima abgebrochen gedacht. hy Tracheenepithel = Tracheenhypodermis = Matrix der chitinigen Intima cc, in welcher der spiralig verlaufende Verdickungsstreifen (Spiralfaden) zu sehen ist.

ist nicht vollständig geklärt, er soll nach **Packard** dadurch zustande kommen, daß die Kerne lange Fortsätze aussenden, die zu dem Spiralfaden werden, indem die einzelnen nahe beieinander gelegenen Fortsätze zusammenwachsen, doch erscheint diese Auffassung nicht sehr wahrscheinlich. Die chitinöse Wandung der Tracheen verhindert ein Zusammenfallen der Wände. Die Haupttracheenstämme gehen in immer feinere Verzweigungen über, deren definitive Endigung noch keineswegs geklärt ist. Sehr häufig gehen Tracheenzweige an große, sich verästelnde Zellen (Fig. 27) heran, die als Tracheenendzellen bezeichnet werden. Untersuchungen (die mit der Golgi-Methode angestellt wurden) haben gelehrt, daß die Tracheen sich noch in diese Zellen hinein fortsetzen und hier ein Netz von unendlicher Feinheit bilden, so daß die letzten Endigungen der Luftkanälchen intrazellulär verlaufen.

Die Tracheen (t) nehmen ihren Ursprung an der Oberfläche des Körpers von segmental angeordneten Oeffnungen aus, den Stigmen (Fig. 28); die Zahl der Stigmen und ihre Anordnung ist sehr verschieden. Bald hat der größte Teil der Körpersegmente je ein Stigmenpaar und Tracheenbündel, bald ist eine mehr oder minder weite Reduktion der Atmungsöffnungen eingetreten. Ja schließlich bleibt oft nur ein einziges Paar übrig, in welchem Falle dann die einzelnen Tracheenbüschel von Längsstämmen ausgehen, die

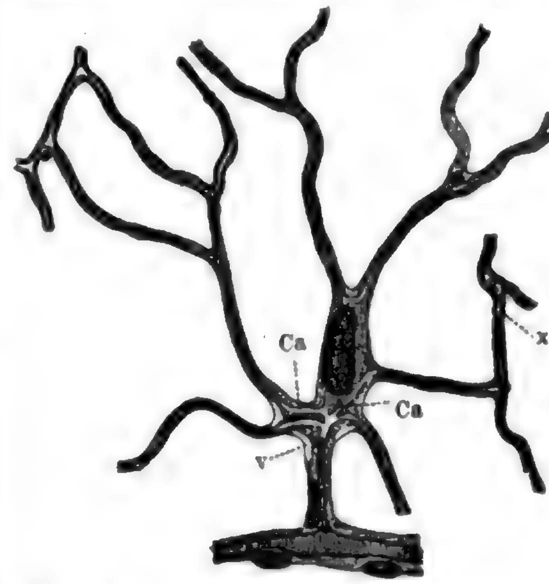


Fig. 27. **Phalera bucephala.** Tracheenendzelle an der Spinndrüse. Ca Endkapillaren, v durch Schrumpfung (?) entstandene Lücken, x fragliche Körner. Nach **Holmgren.** Aus **Schneider.**

von den Stigmen aus den Körper durchziehen. Auch die Verteilung der Tracheen und ihre Verbindung mit Quer- und Längsstämmen zeigt große Verschiedenheiten, auf die nicht näher eingegangen werden soll.

Die Stigmen (Fig. 28 und 29, a) stellen schlitzartige Oeffnungen dar, die von einem

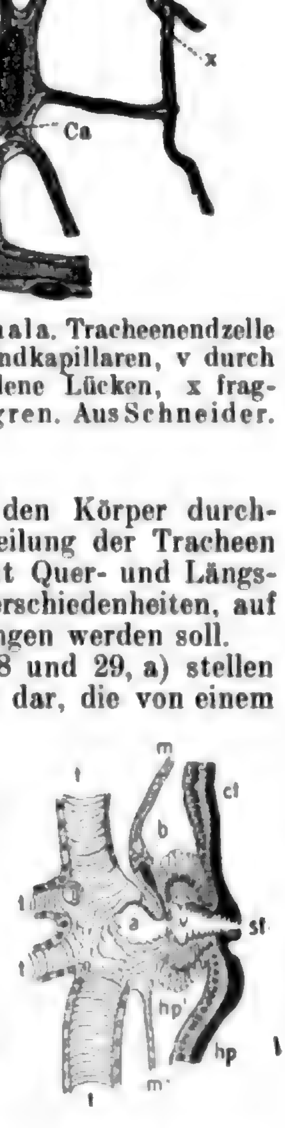


Fig. 28. **Bombyx mori.** Sagittalschnitt durch ein Stigma einer Larve. m_1 m_2 Inspirationsmuskel, b Verschlußhebel, a Verschlußbügel, st Stigma, hyp Hypodermis, hyp_1 Hypodermis des Atriums, ct Cuticula, t Trachee, v Valvula. Nach **Verson** und **Quajat.**

Chitinring umgeben sind. Bei den meisten Insekten ist der Schlitz noch durch eine Reihe von hervorstehenden chitinösen Borsten geschützt, die ein Eindringen von Fremdkörpern verhindern. Die Lippen oder Ränder der Oeffnung sind membranös und können durch eine bewegliche Klappe vermittels eines Schließmuskels verschlossen werden. Dieser Verschlußapparat kommt aber nicht allen Insekten zu. Neben diesem äußeren Verschlußapparat ist dann bei allen Insekten noch ein innerer vorhanden, der

nach Belieben während der Respiration die Trachee abschließen kann. Der Apparat besteht aus einem beweglichen Schließbogen, einem beweglichen Hebel, einem Bandapparat und einem Schließmuskel. Die Funktion dieses Apparats ist ohne weiteres aus Figur 28 und 29, a und b ersichtlich.

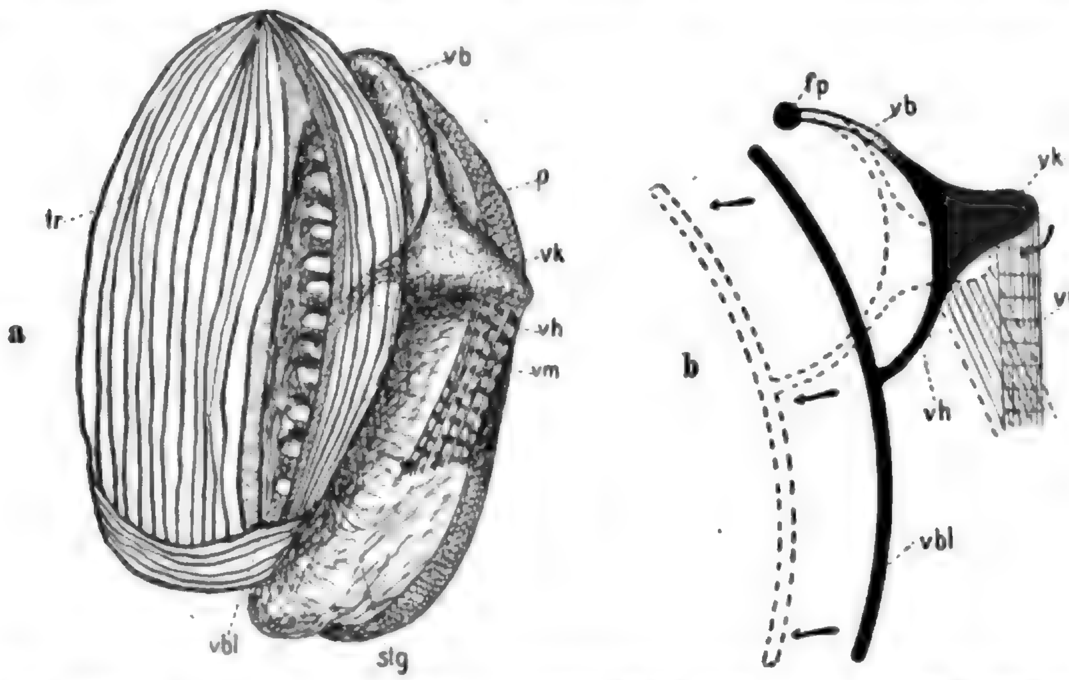


Fig. 29, a und b. Dytiscus marginalis. a Verschlußapparat eines abdominalen Stigmas. Nicht schematisiert. b Schematische Erläuterung des Verschlußmechanismus. fp Fixpunkt, p Peritrema, stg Stigmengrube, tr Trachee, vb Verschlußband, vbl Verschlußbügel, vh Verschlußhebel, vk Verschlußkegel, vm Verschlußmuskel. Nach W. Alt.

Bei fliegenden Insekten sind die Tracheen in gewissen Teilen des Körpers zu Luftsäcken vergrößert (Fig. 30). Bei Larvenformen und

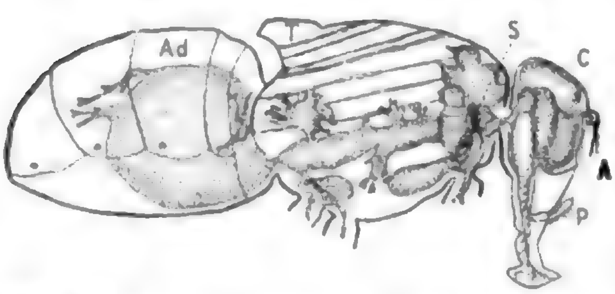


Fig. 30. Musca domestica. Von der Seite, um die hauptsächlichsten Luftsäcke des Kopfes, des Thorax und Abdomen zu zeigen. C Kopf, T Thorax, Ad Abdomen, S vorderes Thoraxstigma, A Antenne, P Palpus. Nach Hewitt.

flügellosen Insekten fehlen diese Säcke vollständig. Letztere zeigen durchaus den Bau von Tracheen, es fehlt ihnen aber der Spiralfaden. Sie sind meistens an der Oberfläche des Körpers gelegen. Die Funktion dieser Säcke besteht weniger darin, das Gewicht des Körpers zu vermindern, als einen großen Luftvorrat aufzuspeichern, um dem während des Fluges sehr großen Sauerstoffbedarf zu genügen. Wir haben es hier wahrscheinlich mit Gebilden zu tun, die den Luftsäcken der Vögel gleichwertig sind. Hier wie dort besteht eine sehr enge Beziehung zum Flugvermögen, da gerade die größten und ausdauerndsten Flieger unter den Vögeln und Insekten die stärksten und wohl entwickeltsten Luftsäcke zeigen.

Die Tracheen sind wahrscheinlich als Gebilde sui generis aufzufassen. Sie haben keinerlei Beziehung zu irgendwelchen anderen Organen verwandter Tiere. Die wahrscheinlichste Herleitung scheint die zu sein, daß sie aus Hautdrüsen entstanden sind; doch dann müßte man einen sehr einschneidenden Funktionswechsel annehmen. Einigermaßen ähnlich sind die Tracheen den Atmungsorganen landlebender Asseln, wo auch mit Chitin ausgekleidete Luftröhrchen in einigen Extremitäten ausgebildet worden sind.

Niedere Zustände der Tracheenentwickelung sind nur bei Peripatus bekannt. Es sind hier sehr feine, einfache, nicht chitinöse Tuben vorhanden, die sich zu Bündeln an der Basis einer flaschenartigen Einstülpung des Integuments vereinigen. Die äußere Oeffnung dieser Einstülpung wird als Stigma betrachtet. Die Tracheen sind ebenfalls noch nicht mit Spiralfäden versehen, die auch die Chilopoden noch nicht besitzen. Die Stigmen sind anfangs noch unregelmäßig angeordnet und erst bei den Myriopoden und Insekten werden sie segmental ausgebildet.

Die Arachnoiden zeigen insofern eigenartige Verhältnisse, als manche nur Röhrentracheen, andere nur Fächertracheen oder Lungenbücher, wieder andere beides zusammen aufweisen. Manchen Arachnoiden fehlt ein eigener Respirationsapparat vollständig, sie sind wieder sekundär zur diffusen Hautatmung übergegangen, die durch die Darmatmung unterstützt wird.

Unter den Insekten gibt es eine ganze Anzahl von Formen, die sich sekundär wieder an das Wasser angepaßt haben oder ihre Entwickelung im Wasser durchmachen. Meist haben aber diese Formen ihre Luftatmung noch beibehalten, die sie dadurch ermöglichen, daß sie von Zeit zu Zeit mittels besonderer Einrichtungen Luft schöpfen. Am häufigsten wird die Atemluft so gewonnen, daß durch Unebenheiten der Körperoberfläche, Haare, Borsten usw., die Luft durch Adhäsion festgehalten wird. Dieses Prinzip ist in hohem Maße bei der Wasserspinne Argyroneta aquatica verwirklicht, bei der der ganze Bauch und die untere Fläche des Cephalothorax unter Wasser mit einer dichten glänzenden Luftschicht umgeben ist, die dann als Atemluft verbraucht wird. Die Luftschicht selbst kann auch als Atemorgan funktionieren, indem der durch die Atmung verbrauchte Sauerstoff durch den im Wasser enthaltenen Sauerstoff durch Diffusion eine Zeitlang ersetzt werden kann. Manche Insektenlarven (Donatia) können sogar ihre Atemluft den Wasserpflanzen entziehen, indem sie die Wurzel derselben annagen und dann vermittels eines sichelartigen Anhangapparates am Hinterleib sich an der Wunde festhaken. Sie können so die Atemluft aus den Luftkanälen der Pflanze entnehmen.

Trotzdem nun wunderbare Einrichtungen getroffen worden sind, die Luftatmung auch unter Wasser aufrecht zu erhalten, so bahnen sich doch schon Verhältnisse an, um eine reine Wasseratmung sekundär zu ermöglichen. Die Atmung unter Wasser kann eine diffuse primitive Hautatmung sein, in den meisten Fällen jedoch sind eigenartige Respirationsvorrichtungen entstanden, die wir als Tracheenkiemen bezeichnen. Es sind das zarte, schlauch-, blatt- oder büschelförmig gestaltete Hautanhänge, die mit einem sehr reichlichen Netz von Tracheen versehen sind. Die Tracheenkiemen treten meist an der Oberfläche des Körpers auf (Fig. 31 A), können aber auch im Innern des Mastdarmes (Odonaten) (Fig. 31 B) sich bilden. Wir haben es hier mit einem geschlossenen sekundären apneustischen Tracheensystem zu tun, das im Gegensatz steht zu den vorhin geschilderten holopneustischen. Bei dem geschlossenen oder apneustischen Tracheensystem fehlen die Stigmata oder sie sind, wenn sie noch vorhanden sind, funktionslos. Das Tracheensystem kann also nicht direkt mit der Luft kommunizieren. Wie der Atmungsprozeß abläuft, ist noch nicht im einzelnen geklärt, wahrscheinlich wird die Füllung der Tracheen durch besondere Zellkräfte bewirkt. Es findet dann vermittels der sehr dünnen Chitinwände ein Gasaustausch des Innern mit dem umgebenden Wasser statt. Die Erhaltung der Gasfüllung und des Gasaustausches ist also wahrscheinlich das Werk von Zellkräften, mithin von Sekretionsvorgängen.

Bei den Odonaten liegt der Atemapparat in einer ampullenförmigen Erweiterung des Rektums, das durch rhythmisch pumpende Bewegung des Afters stets mit frischem Wasser versorgt wird. Das Atemorgan besteht aus einer großen Zahl zu Büscheln vereinigter Papillen, die von

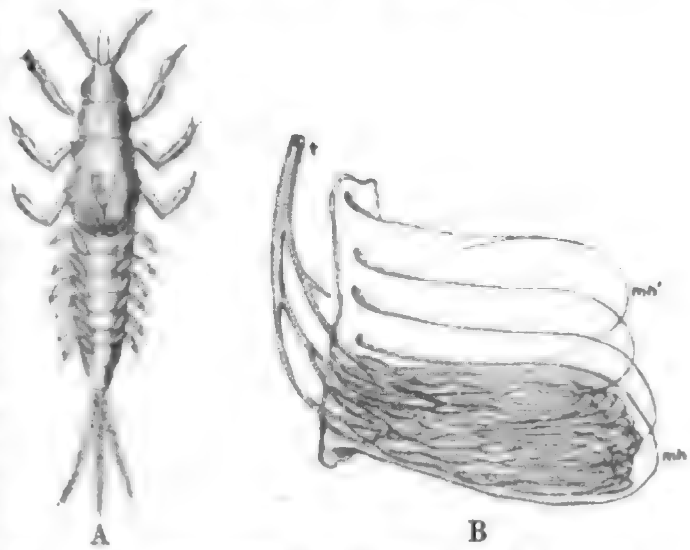


Fig. 31 A. Ephemeridenlarve mit je zwei Tracheenkiemen jederseits an den Abdominalsegmenten und mit 3 Schwanzfäden (Cerci). Nach Leuckart. Aus Lang.

Fig. 31 B. Libellula vulgata. Kiemenlamellen einer Larve. 950fach vergrößert. t Trachee, mh mh′ hyaline Membran; man sieht die bogenförmig die Lamellen durchziehenden Tracheenäste. Nach Oustalet.

bogenförmigen feinen Tracheenschlingen durchzogen werden. Die Zahl der Papillen beträgt bei Aeschna maculatissima 24000. Die Libellenlarven haben sich unter normalen Verhältnissen vollständig der Luftatmung entwöhnt. Werden sie jedoch in schlechtem oder ausgekochtem Wasser gehalten, so nehmen sie von Zeit zu Zeit Luft mit der Hinterleibsspitze in den Darm auf. Es ist dieses eine Notatmung, die auch von den Holothurien (nach Winterstein) in ähnlicher Weise ausgeführt werden kann und die ebenfalls bei Fischen in der buccalen Notatmung ihr Analogon hat.

Manche Insektenlarven haben auch normalerweise Einrichtungen, die sie befähigen, bald Wasser, bald Luft zu atmen. So können die Larven von Paltostoma in der Luft durch am Hinterleib gelegene Stigmen atmen, im Wasser dagegen atmen sie durch aus dem After vorstreckbare Tracheenkiemen.

4. Respirationsorgane, die sich genetisch vom Darme ableiten. Auch bei den vorher geschilderten Wirbellosen war häufig schon der Darmkanal zur Unterstützung der respiratorischen Tätigkeit der Haut mit herangezogen worden. Bei den Wirbeltieren und ihren Vorläufern, den Prochordaten, kommt nun ein Respirationsorgan zur Ausbildung, das zunächst aus-

schließlich für das Wasser angepaßt ist und einfach aus Spalten des Vorderdarmes besteht, die durch entsprechende ektodermale Einstülpungen mit der Außenwelt in Verbindung stehen. Bei den primitivsten Formen wird mit der Atmung noch die Nahrungsaufnahme verbunden. Das Atemwasser mit den Nahrungspartikelchen strömt durch den Mund in den Vorderdarm ein und während nun das Atemwasser durch die Kiemenspalten vermittels Wimperschlag wieder herausgetrieben wird, gelangen die festeren Nahrungspartikel vermittels einer ventralen kräftigen Flimmerrinne (Endostyl) in den Darmkanal. Die die Spalten trennenden Septen erfahren schließlich durch Ausstülpungen eine mächtige Oberflächenvergrößerung und werden so zu Kiemen, die bei allen Fischen und Amphibien vorkommen. Mit dem Uebergang zur terrestrischen Lebensweise werden die Kiemen rückgebildet und statt ihrer entstehen zwei ventrale Aussackungen am Darm als Derivate der hintersten Kiementaschen, die nun als Lungen die Luftatmung übernehmen. Wasseratmung und Luftatmung sind also bei den Wirbeltieren an verschiedene Organsysteme gebunden, die in keiner Weise im ausgebildeten Zustand miteinander verglichen werden können, die aber jedes für sich eine außerordentlich einheitliche Reihe darbieten, wie wir sie sonst bei den Respirationsorganen nicht anzutreffen gewohnt sind.

4a) Die Kiemenatmung. α) Prochordaten. Die primitivsten Zustände der Kiemenatmung treffen wir bei den Prochordaten an, unter die wir die Enteropneusten, Tunicaten und Acranier zusammenfassen. Die Bildung der Kiemenspalten erfolgt bei den Enteropneusten, wie auch bei den Tunicaten und Chordaten, durch aufeinanderfolgende Vorwölbungen des Darmepithels dem Ektoderm zu, wobei dann an der Berührungsstelle der beiden Epithelien der Durchbruch der Kiemenspalte erfolgt. Der Kiemenapparat besteht bei den Enteropneusten aus einer beträchtlichen, bei den einzelnen Formen verschiedenen Zahl von Einzelkiemen, die paarweise an der dorsolateralen Seite des Vorderdarmes zwischen den Kiemenspalten gelegen sind. Die äußere Oeffnung ist einfach schlitzförmig, die innere hat durch einen von der Darmwand ausgehenden zungenartigen Fortsatz (Fig. 32 kz), die Kiemenzunge, eine U-förmige Gestalt erhalten. Die Leibeshöhle setzt sich in diese Kiemenzungen, wie auch in die die Kiementaschen voneinander scheidenden Septen fort. Die Wandungen beider besitzen ein reiches Kapillarnetz. Ueberzogen werden die Kiemenzungen, Septen und inneren Wände der Kiementaschen von einem hohen Flimmerepithel (Fig. 32), während die hintere Wand der Taschen niederes Epithel aufweist.

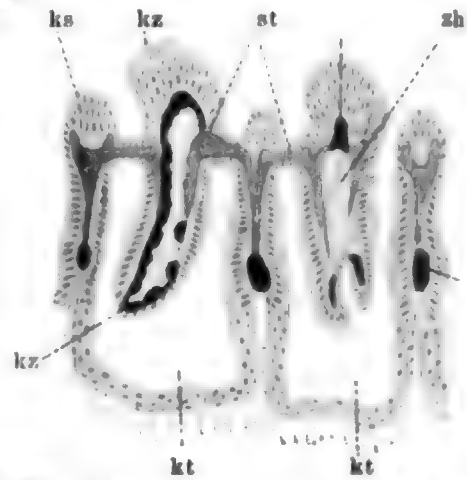


Fig. 32. Ptychodera sarniensis. Querschnitt zweier Kiemen. kt Kiementasche, st Synaptikel, zh Zungenhöhle, kz Kiemenzunge, ks Kiemenseptum. Nach J. W. Spengel.

Ganz ähnliche, wenn auch etwas weiter differenzierte Zustände, haben wir bei den Tunicaten. Am einfachsten ist der Atmungsapparat bei den Appendicularien ausgebildet, wo der sackartige Kiemendarm jederseits nur eine Kiemenspalte besitzt, die durch das Spiraculum nach außen mündet. In diesem sind kräftige Wimperringe enthalten, die einen kontinuierlichen Wasserstrom erzeugen. An der dünnen Wand des Kiemendarms befinden sich zwar schon Bluträume, es wird jedoch die Kiemenatmung bei diesen Tieren noch von einer ausgedehnten Hautatmung unterstützt.

Die vollständigste Ausbildung hat das Atemorgan bei den Ascidien erfahren, wo der vordere Darmabschnitt durch zahllose, meist schlitzförmige Oeffnungen in ein Gitterwerk verwandelt ist. Zahlreiche von diesem Gitter ausgehende Quer- und Längsfalten, sowie Ein- und Ausbuchtungen der ganzen Darmwand sorgen für eine Vergrößerung der respiratorischen Oberfläche. Das ganze Gebilde wird als Kiemenkorb (Fig. 33) bezeichnet, dessen Lamellen von Bluträumen durchzogen werden und von einem Flimmerepithel bekleidet sind, das einen kontinuierlichen Atemstrom erzeugt. Ventral durchzieht den Kiemenkorb das sogenannte Endostyl, das aus einer Flimmerrinne besteht, der sich lateral jederseits eine obere drüsige Wand anschließt. Der Kiemenkorb liegt in einem Peribranchialraum, der aus sackförmigen Einstülpungen des Ektoderms entstanden ist und zum Schutz des zarten Kiemenkorbes dient.

Ganz ähnlich ist auch der Atemapparat von Amphioxus ausgebildet. Auch hier münden die zahlreichen Kiemenspalten nicht nach außen, sondern in einen Peribranchial-

raum, der im Porus abdominalis vor dem After nach außen mündet. Auf Larven-

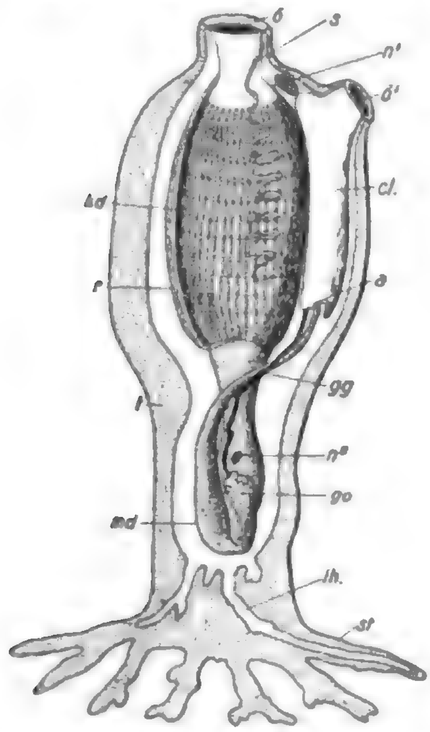


Fig. 33. Organisation einer einfachen Ascidie. ö Mund, ö' Auswurfsöffnung, a After, md Mitteldarm, kd Kiemendarm, gg Genitalgang, go Gonade, s Flimmerrinne, r Endostyl, st Stolonen, lh Höhlungen in diesen Stolonengängen, t Tunica, n' Ganglion. Nach Haller.

stadien münden jedoch diese Kiemenspalten frei nach außen. Die Zahl der Spalten ist zunächst nur gering, es sind 8 bis 9 jederseits vorhanden. Später nimmt die Zahl der Spalten durch Neubildung und Teilung der vorhandenen erheblich zu. Der Peribranchialraum legt sich dorsal als eine Hautfalte jederseits über der Reihe der Kiemenspalten an. Die beiden Hautfalten schieben sich dann über sie vor und verwachsen in der ventralen Mittellinie. Die große Zahl der Spalten bei Tunicaten und Amphioxus wird dadurch bedingt, daß jede einzelne nur eine kleine respiratorische Oberfläche besitzt.

β) Fische und Amphibien. Bei den Fischen und Amphibien kommen nun Neubildungen hinzu, die eine Verringerung der Kiemenspalten möglich machen. Es sind nie mehr als 8, meist aber nur 5, bei den Amphibien sogar nur 4 Kiemenspalten vorhanden. Die Atemfläche wird hier jedoch im Bereich der Spalten durch feine blutgefäßreiche und dünnwandige Faltenbildungen erhöht, die wir als Kiemenblättchen bezeichnen. Die Vervollkommnung des Organes macht sich schon äußerlich durch geringeren Umfang bemerkbar. Bei den Tunicaten nimmt der Kiemenapparat weit mehr Platz ein als alle anderen Organe zusammen. Beim Amphioxus nimmt er noch die volle Hälfte des gesamten Darmes ein. Bei den Cyclostomen reicht der Kiemenapparat an das zweite Sechstel des Körpers heran. Auch bei den Selachiern nimmt er noch ein Siebentel bis ein Neuntel der Körperlänge ein, während er bei den Teleostiern ganz in die Kopfregion einbezogen worden ist.

Durch die ganze Reihe der Fische sind die Kiemenspalten morphologisch gleichwertig. Sie werden als sackartige Ausstülpungen des Vorderdarmes angelegt, die nach außen durchbrechen. Vorn und hinten werden sie durch Gewebsspalten begrenzt, die als Schlundbogen bezeichnet werden und bei allen Fischen homolog sind. Der erste ist der Kieferbogen, der zweite der Hyoidbogen, worauf eine wechselnde Anzahl von Branchialbogen folgen. In den Branchialbögen verlaufen die vom Herzen kommenden zuführenden Gefäße, die Kiemenarterien und ihre abführenden Kiemenvenen, die dorsal vom Schlund zur Aorta zusammentreten. Bei den Cyclostomen wird die vorderste Kiemenspalte, zwischen Kiefer und Hyoidbogen gelegen, wohl noch angelegt, kommt aber nicht zum Durchbruch. Es sind dann noch weitere sieben funktionelle Spalten vorhanden. Bei den Selachiern und einigen Ganoiden wird diese erste Kiemenspalte zum sogenannten Spritzloch, das an der Oberseite des Kopfes nicht weit von den Augen liegt. Bei den meisten Fischen werden außer dieser ersten Kiemenspalte noch weitere und zwar die hintersten rückgebildet, so daß bei den meisten Selachiern und Ganoiden nur 5 Kiemenspalten erhalten bleiben. Im Bereich dieser Spalten entwickeln sich nun die Kiemen, die, obwohl sie gleiche Leistungen haben und eine große Aehnlichkeit im Bau zeigen, doch nicht morphologisch gleichwertig sind. Bei den Cyclostomen entstehen die Kiemen aus dem Teil der Spalten, der entodermalen Ursprungs ist. Man kann sie daher als Darmkiemen bezeichnen. Die Selachier, Ganoiden und Teleostier dagegen haben ektodermale Kiemen (nach Goette), entstehen also aus dem äußeren Hautüberzug der Kiemenbogen; sie sind Hautkiemen. Die zum Spritzloch gehörige Kieme dagegen ist auch hier entodermaler Herkunft.

Die sieben Paar Kiemenspalten der Cyclostomen sind zu Kiementaschen erweitert. Die Spalten, die direkt nach außen münden, sind umsäumt von einem Ringknorpel und durch eine muskulöse Klappenvorrichtung verschließbar. An den Septen zwischen den einzelnen Kiementaschen kommen nun die Kiemenblätter (Fig. 34) zur Entfaltung. Es sind das an ihrer Basis, an der sie angewachsen sind, breite, dem

freien Ende zu sich verschmälernde platte Lamellen. So kommt jeder Kiementasche eine vordere und hintere Blätterreihe zu. Die Kiemenblätter sind nun ihrerseits wieder nach hinten und vorn zu Kiemenblätter in großer Anzahl tragen (Fig. 35 a). Bemerkenswert ist, daß sich jetzt in den Septen knorpelige Stäbe, die Kiemenbögen, aus-

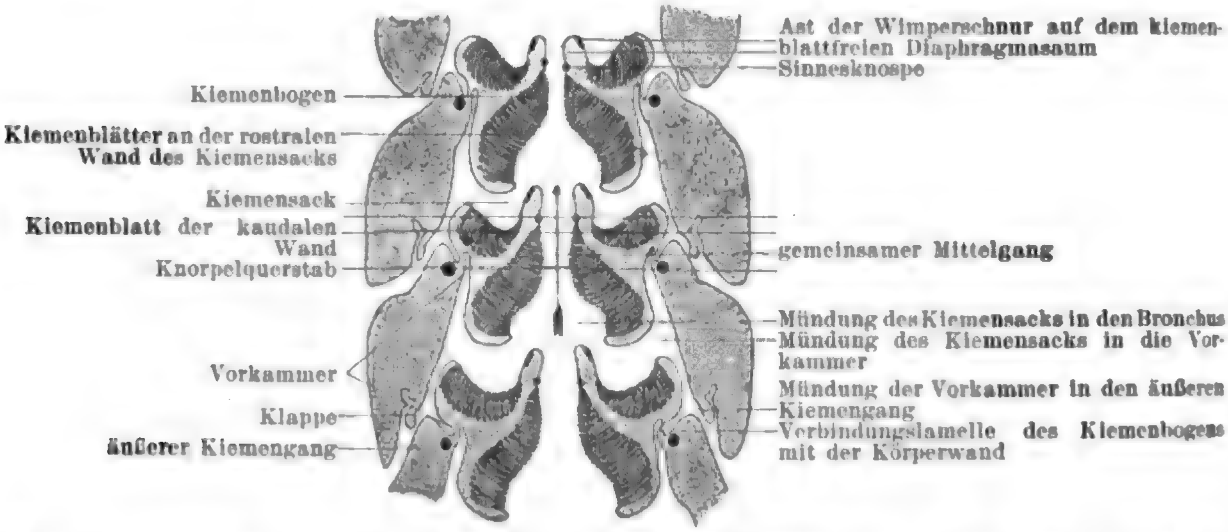


Fig. 34. Ammocoetes. Frontalschnitt durch zwei Kiemensäcke. Schematisch. Der Pfeil zeigt rostralwärts. Die A, B und C zeigen die Ebenen der abgebildeten Querschnitte A, B und C an. Nach Schaffer.

mit Zotten versehen, die in einer Querreihe angeordnet sind.

Von diesen primitiven Zuständen der Petromyzonten lassen sich die Kiemenverhältnisse der Selachier ableiten. Es sind

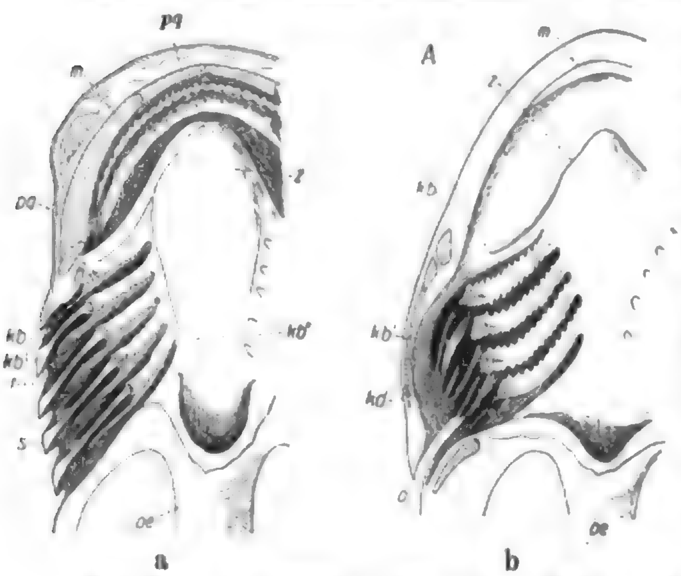


Fig. 35a. Acanthias vulgaris. Kopf, nach Abtragung des Schädels von oben. pq Palatoquadratum, z Zunge, oe Oesophagus, m Mund, kb Kiemenbögen, kb' Kiemenblätter, s Septum, t Kiemenspalten. Nach Haller.

Fig. 35b. Salma salar. Kopf, nach Abtragung des Schädels von oben gesehen. m Mund, z Zunge, kd Kiemendeckel, kb Kiemenbögen, kb' Kiemenblätter, ö Kiemenöffnung, oe Oesophagus. Nach Haller.

wieder Kiementaschen vorhanden, die durch Septen vollständig abgegrenzt sind und bilden, die nun zum Träger der Kiemen werden. Es besteht also die ganze Kieme aus je einem Kiemenbogen und der hinteren Halbkieme der vorderen, sowie der vorderen Halbkieme der nächst hinteren Kiemenplatte. Die vorhandenen fünf Kiemenplatten münden mit getrennten Oeffnungen nach außen. Ferner tritt nun hier auch zum ersten Male ein die äußeren Kiemenspalten überlagernder Kiemendeckel auf, der sich als eine Hautfalte vom Hyoidbogen aus anlegt, in den sich Knorpelstrahlen zur Stütze hineinentwickeln. Allmählich lösen sich nun die Septen vom äußeren Integument los, wie das schon bei den Chimären der Fall ist und endigen nun frei in einer durch diesen Prozeß zustande gekommenen Kiementasche (Fig. 35 b), als deren Ueberdachung der Kiemendeckel bestehen bleibt. Durch diesen Schwund der Septen, der bei den Ganoiden und Teleostiern noch weiter vorschreitet, gelangt die Einheitlichkeit jeder Kieme und ihres Kiemenbogens zum vollen Ausdruck. Es sind dann vier Kiemenblätter auf vier entsprechenden Kiemenbögen vorhanden, die fest aneinander liegen und so den ganzen Kiemenapparat vorstellen. Die Länge der mit Kiemenblättchen besetzten Strecke und damit die Zahl der Blättchen selbst und die ganze Atemfläche wird noch dadurch vergrößert, daß der ganze Kiemenbogen nicht gerade von oben herunter verläuft, wie bei den Selachiern, sondern unter mehr oder weniger spitzem Winkel nach hinten geknickt ist. Gegen den Mundraum sind die

Kiemen der Knochenfische vor Verletzungen durch einen sogenannten Reusenapparat geschützt. Die Kiemenbögen sind innen mit übereinandergreifenden oder die Spalten überdeckenden Fortsätzen besetzt, die eine Verunreinigung der Kiemen verhüten und ein Fortschwimmen der Beutetiere mit dem Atemwasser verhindern.

Der feinere Bau einer Kieme ist kurz folgender:

Meist gehen von dem Kiemenbogen eine doppelte Reihe von Kiemenblättchen aus, die nach Schwund des Septums als Kiemenfäden nebeneinander liegen bleiben. Jederseits sind sie wieder mit senkrecht zu ihnen stehenden reich vaskularisierten Fältchen versehen (Fig. 36).

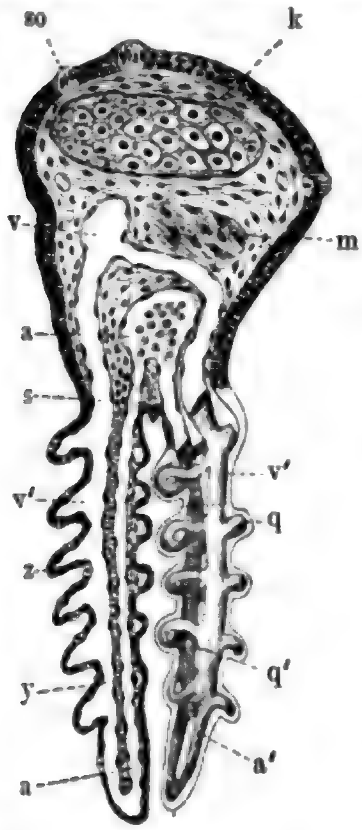


Fig. 36. Salmo fario. Querschnitt durch einen Kiemenbogen samt den beiden Kiemenblättern eines jungen Tieres noch mit Dottersack. k Kiemenbogen, m Muskel, v Kiemenbogenvene, a Kiemenbogenarterie, v' Kiemenblattvene, a' Kiemenblattarterie, q Querast, y Zwischengewebe, s Septumrest, so Sinnesorgan. Das rechte Kiemenblatt ist nach einem anderen Präparat eingetragen. Nach Oppel.

Unter den Kiemenbögen verläuft die Kiemenarterie (a) und oberhalb derselben die Kiemenvene (v). Aus ihnen gelangt je ein Ast in ein Kiemenblatt, wie das Fig. 36 zeigt. Die Kiemenblättchen sind von einem einschichtigen Epithel überzogen; am Ende jedes Blättchens gehen Vene und Arterie ineinander über. Zwischen beiden Gefäßen befindet sich ein Strang von großzelligem Bindegewebe. In den Kiemenlamellen splittern sich die Blutgefäße immer mehr aus, gehen hier aber nicht in eigentliche Kapillaren über, sondern in feine Spalträume, die von dem Stützgewebe selbst gebildet werden. Sie bestehen aus eigentümlich geformten Zellen, den Pilasterzellen (Fig. 37 Pz). Im Gegensatz zu den Amphibienkiemen und den Lungen aller Lungenatmer ist, wie Oppel sagt, in der Fischkiemenlamelle der Raum, den das Stützgewebe einnimmt, auf ein Minimum reduziert; die fast bindegewebsfreien und die blutführenden Räume haben die Stützfunktion auf sich genommen (Pilasterzellen). Die Fischkiemenlamelle stellt, da das Wasser von allen Seiten an die Kapillaren heran kann, das am höchsten differenzierte wasseratmende Organ der Wirbeltiere dar. Im kleinsten Raum ist hier die größte Atemausnutzung der Oberfläche entwickelt.

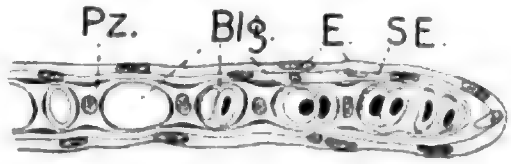


Fig. 37. Scorpaena porcus. Querschnitt durch eine Kiemenlamelle, E Oberflächenepithel, SE subepitheliale Membran, Pz Pilasterzellen, deren Randkonturen verstärkt sind, um dieselben plastisch hervortreten zu lassen; Blg Blutgefäßräume, zum Teil mit Blutkörperchen, zum Teil ohne solche. Vergrößerung 640fach. Nach Oppel.

Bei den Fischen können nun auch noch andere Organe die Rolle der Atmung mit übernehmen. So spielt sicher die Hautatmung bei manchen Formen, z. B. beim Aal, eine große Rolle. Ebenso kann die Mundhöhlenatmung, die als Notatmung aufgefaßt wird, von Wichtigkeit sein, und zwar zum Zweck der Durchlüftung des Atemwassers. Bei den Schlammpeitzger unterstützt die Darmatmung die Kiemenatmung in wesentlichem Maße, indem dieser Fisch von Zeit zu Zeit Luft schnappt, die durch den After wieder entleert wird.

Der Mechanismus der Kiemenatmung verläuft bei den Fischen im allgemeinen so, daß das Atemwasser durch den Mund eintritt und durch die Kiemenspalten hindurch nach außen gepreßt wird. Der Prozeß verläuft in zwei Stadien. Zuerst wird die Mundhöhle durch abwärtsbewegen des Mundbodens erweitert, das Maul geöffnet und der Kiemendeckel gehoben. Es strömt dabei sowohl durch den Mund als durch den Kiemendeckel Wasser ein. Es folgt dann eine allgemeine Zusammenziehung, wodurch das Wasser durch die Kiemenspalte hinausgepreßt wird, da der Mund sich durch eine, hinter der Oeffnung stehende ventilartig angebrachte Hautfalte schließt. Die Rochen dagegen saugen das Atemwasser durch das dorsal gelegene Spritzloch ein. Die Petromyzonten zeigen bei der Larve und dem erwachsenen Tiere verschiedene Atmungseinrichtungen. Die Larve atmet wie die Knochenfische durch den Mund. Die erwachsenen Tiere jedoch gehen zur parasitischen Lebensweise über, indem sie sich mit ihrem Munde an einen Fisch festsetzen. Der Vorderdarm wird nun bei ihnen durch eine Schleimhautfalte in einen dorsalen Speisedarm und in einen ventralen Kiemendarm getrennt. Die Atmung erfolgt durch

Erweiterung und Verengerung des Branchialraumes, wobei das Wasser durch die Kiemenspalten ein- und ausströmt.

γ) Akzessorische Branchialorgane der Fische. Bei einer Reihe von Fischen sind akzessorische Branchialorgane ausgebildet worden, wie wir sie z. B. bei den Labyrinthfischen (Anabas scandens) kennen. Diese Tiere besitzen die Fähigkeit, längere Zeit außerhalb des Wassers zu leben und zwar vermittels eines eigentümlichen, mit der Kiemenhöhle kommunizierenden Labyrinthapparates. In ihrer höchsten Ausbildung bestehen diese Apparate aus einer Reihe reich mit vaskularisierter Schleimhaut überzogener Knochenlamellen (Fig. 38), für deren Feucht-

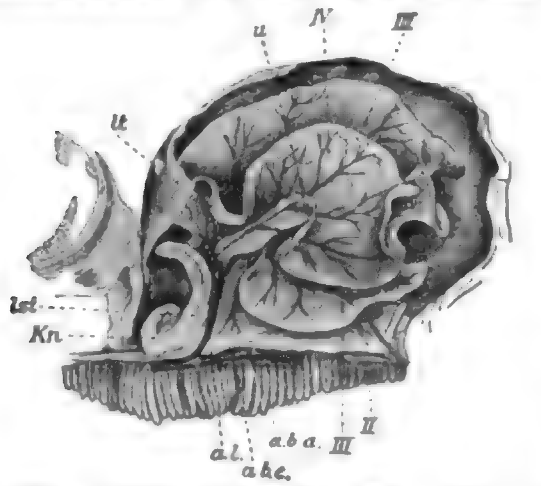


Fig. 38. Anabas scandens var. macrocephalus. Labyrinth, in welchem die gröberen zuführenden Labyrinthgefäße eingezeichnet sind. 3fach vergrößert. II, III, IV Grundplatten, u Umbiegungsrand der Platte IV zur Bildung der Lamelle 5, lt Labyrinthtasche, lst Labyrinthstamm, Kn Nebenorgan, a.l. Arteria labyrinthica, a.b.e. Arteria branchialis efferens, a.b.a Arteria branchialis afferens. Nach Henninger.

haltung zahlreiche Becherzellen, die Schleim absondern, in Betracht kommen. Das Organ ist als eine Erweiterung der Kiemenhöhle über dem ersten und zweiten Kiemenbogen aufzufassen. Die Labyrinthtasche öffnet sich sowohl unter dem Kiemendeckel nach außen, wie auch in die Mundhöhle. Die Labyrinthfische vermögen nun vermittels dieses Apparates Luft zu atmen. Die Tiere kommen von Zeit zu Zeit an die Oberfläche, um Luft in das Labyrinthorgan einzuführen. Sie sind soweit an diese Atmung angepaßt, daß sie selbst in sauerstoffreichem Wasser ersticken, wenn sie nicht an die Oberfläche kommen können, andererseits aber in ausgekochtem Wasser sehr wohl zu leben vermögen, wenn sie nur die Möglichkeit haben, Luft zu schnappen. Auch andere, meist schlammbewohnende Fische haben akzessorische Branchialorgane entwickelt. So die Clupeiden und Siluriden. Auch hier handelt es sich um sackförmige Ausstülpungen der Kiemenbögen, die reich vaskularisiert sind. Bei manchen Arten ragen noch baumförmig verästelte Gebilde in diese Taschen hinein. Auch hier wird es sich wahrscheinlich um Organe der Luftatmung handeln.

δ) Schwimmblasen-Lungenatmung der Dipnoer. Eine eigenartige Stellung nehmen die Dipnoer ein, die als Uebergangsformen zwischen Fischen und Amphibien aufgefaßt werden müssen. Sie haben neben der Atmung zum Teil durch innere, zum Teil auch durch äußere Kiemen noch eine solche vermittels der Schwimmblasen, die vom letzten Aortenbogen mit venösem Blut versorgt werden. Die Schwimmblasenschleimhaut hat durch maschige Erhebungen eine reich entwickelte Oberfläche bekommen, die in der Kompliziertheit des Trabekelsystems sogar die Lunge der Amphibien zum Teil noch übertrifft. Der bekannteste der Lungenfische Protopterus und der amerikanische Lepidosiren verbringen einen großen Teil ihres Lebens außerhalb des Wassers. Wenn nämlich in der heißen Jahreszeit die Sumpfgewässer, in denen sie leben, austrocknen, bohren sie sich in den Schlamm ein und decken ihren Sauerstoffbedarf durch Luftatmung. Ceratotus, ein Lungenfisch Australiens, kommt alle 30 bis 40 Minuten an die Oberfläche, um unter dumpf grunzendem Geräusch seine Schwimmblasenluft zu erneuern.

Zu diesen Lungen der Dipnoer bilden den Uebergang große durch Gefäßreichtum ausgezeichnete Schwimmblasen einer Reihe von anderen Fischen. Namentlich kommen hier die Schwimmblasen der Ganoiden Lepidosteus und Amia in Betracht. Die Lungenatmung vollzieht sich bei den Dipnoern nicht durch einen Schluck-, sondern durch einen Saugmechanismus (vgl. auch Atmung der Amphibien). Sie bleiben also bei der Luftatmung dem Mechanismus der Wasseratmung im wesentlichen treu. Bei den Dipnoern ist auch schon ein Kehlkopf in Form eines hinter dem Kiemendarm liegenden Längsschlitzes vorhanden, der in das Vestibulum pulmonum (Ductus pneumaticus) einführt. Der Schlitz besitzt eine ventrale mediane Lage und steht unter der Herrschaft von drei Muskeln, nämlich dem Musculus dilatator, Sphincter laryngis und Constrictor laryngis. Knorpelige Elemente sind noch nicht im Kehlkopfe vorhanden.

ε) Amphibienkiemen. Da die Amphibien wenigstens während ihrer Larvenperiode alle noch durch Kiemen atmen, so seien diese Zustände hier gleich angefügt. Die Urodelen atmen durch äußere Kiemen, die Anuren dagegen nach dem frühzeitigen Schwund der äußeren Kiemen durch innere. Die Perennibranchiaten behalten zeitlebens die Kiemenatmung neben der Lungenatmung bei. Interessant ist, daß auch der junge Polypterus und Ceratodus (Fig. 39) typische Amphibienkiemen besitzt. In der Regel sind drei Paar gefiederte, verästelte Kiemen vorhanden, die ihren Ursprung vom Ektoderm nehmen, von Fischkiemen jedoch

grundverschieden sind (Fig. 40, a bis f). Auch von entodermalen Kiemen finden sich noch Spuren in Gestalt von kiemenartigen Querleisten an der Wand der Kiemenspalte. Bei den meisten Amphibien bleiben die Kiemen bis zu der Metamorphose frei. Bei den

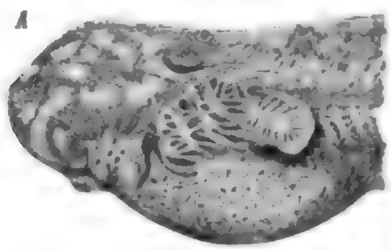


Fig. 39. Polypterus senegalus. Kopf eines Embryo von 5,75 mm. Nach J. Graham Kerr.

Anurenlarven werden sie jedoch von Hautfalten überwachsen, die wie die Kiemendeckel der Fische eine besondere Kiemenkammer einschließen. Entweder hat eine jede Kammer eine gesonderte Oeffnung oder es ist eine gemeinsame mediane oder endlich nur eine gemeinsame linksseitige vorhanden. Der Atmungsprozeß ist ähnlich wie bei den Fischen. Bei der Metamorphose schwinden die Kiemen und die vorderste Kiemenspalte bleibt in großer Ausdehnung als Mittelohr und Eustachische Röhre bestehen.

Die morphologischen Grundlagen des Kiemenapparates sind der ganzen Wirbeltierreihe, auch den niemals wasseratmenden Amnioten, so fest aufgeprägt, daß ständig noch vom Vorderdarme der Embryonen Schlundtaschen angelegt werden. Manchmal sogar wie beim Hühnchen, können sie noch zu wirklichen Kiemenspalten werden. Auch die Kiemenbögen und die darin verlaufenden Gefäße werden noch in ganz derselben Weise angelegt wie bei den Fischen (s. den Artikel „Cirkulationsorgane").

4b) Die luftatmenden Wirbeltiere. α) Ableitung der Lunge. Beziehung zu Kiementaschen und Schwimmblase (Luftsack). Als Organe für die Luftatmung kommen außer der untergeordneten Haut- und Mundhöhlenatmung bei niederen terrestrischen Vertebraten, die Lungen in Betracht, die sich in ihrer Entstehung eng an die Kiemen anschließen. Bei den Larven der Froschlurche entsteht die Lungenanlage an der ventralen Seite des primären Vorderdarmes und schließt sich eng an das letzte Paar der Darmkiementaschen an (Fig. 41). Sie erscheint daher diesen morphologisch gleichwertig. Auch bei den Petromyzonten sind hinter der achten Kiementasche noch zwei rudimentäre im Bereich der Leibeshöhle liegende Kiementaschen vorhanden, die den Lungenanlagen der Amphibien gleichen (Fig. 42). In ganz ähnlicher Weise hat sich nun auch die Schwimmblase gebildet. Allerdings liegt hier die Anlage meist dorsal.

Da ja nun auch die Schwimmblase bei den Dipnoern zur Lunge wird, so hat es nicht an Versuchen gefehlt, beide Organe miteinander in phylogenetische Verbindung zu bringen. Es hat das zur Aufstellung von einer ganzen Reihe von Hypothesen geführt, auf die ich jedoch nur ganz kurz eingehen kann. Nach Wiedersheim soll die dorsale Schwimmblasenanlage eine gesonderte selbständige Anlage sein, die mit der Lunge nichts zu tun hat. Als Stütze dieser Auffassung führt er vor allem an, daß bei

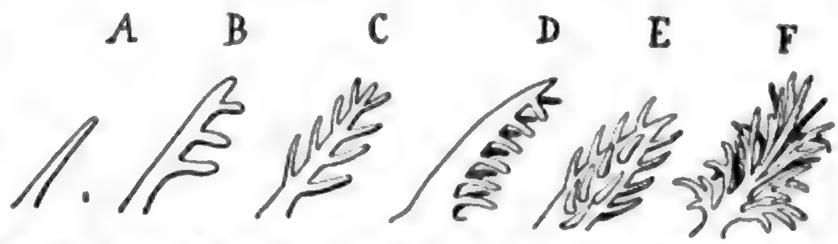


Fig. 40. Entwickelung der Amphibienkieme (phylogenetisch und z. T. ontogenetisch). A Ausgangsform (z. B. bei Dactylethra), B Geweihform der Anurenkieme, C Fiederform der Derotromen- und ursprünglich Gymnophionenkieme, D Entwickelungsstufe der meisten Urodelen, E Axolotl, Menochranchus, F Kiemenkörper verzweigt (Proteus, Siren lacertina). Zum größten Teil nach P. Clemens.

Lepidosiren paradoxa neben einem Larynx ventralis auch noch die Spuren eines dorsalen Schwimmblasenlarynx vorhanden sind. Die Schwimmblasenanlage ist zudem meist unpaar, nur bei den Lurchfischen, Protopterus und Lepidosiren, ist sie paarig und in einem Falle, bei Polypterus, liegt sie zugleich ventral vom Darm. Auch bei Ceratodus mündet die dorsal gelegene Schwimmblase auf der ventralen Seite des Darmes ein.

Nach anderer Ansicht (Sagemehl, Graham Kerr) sollen sämtliche Schwimmblasen ursprünglich eine ventrale mediane Anlage gehabt haben. Im Laufe der Phylogenese soll dann das Organ bei den Teleostiern um die linke, bei den Dipnoern um die rechte Seite des Darmes dorsal gewandert sein. Damit wären also Schwimmblasen und Lunge von einer gemeinsamen Urform ableitbar und auch die Schwimmblase wäre damit als ein ursprüngliches Atmungsorgan anzusehen, das sich später zu einem hydrostatischen Organ umwandelte.

Nach den embryologischen Untersuch-

ungen von Goette ist an eine Homologie von Schwimmblase und Lunge nicht zu zweifeln. Namentlich, da bei Polypterus ein paariges ventrales Organ aus dem Darm hervorgeht, das als Schwimmblase funktioniert und bei allen Amnioten als Lunge vorkommt. Dazu steht als Extrem das einheitliche über dem Darm gelegene in den Vorderdarm mündende Organ, die Schwimmblase der meisten Teleostomen. Zwischen diesen Extremen kommen nun aber alle Abstufungen und Kombinationen von dorsaler und ventraler Lage und Mündung, einfache sowohl wie verschieden geteilte Luftsäcke mit echter Luftatmung und anderen Funktionen ausgestattet, vor. Danach kann die Homologie von Schwimmblase und Lunge nicht mehr bezweifelt werden. Es rückt jetzt die Frage in den Vordergrund, wie der stammesgeschichtliche Zusammenhang der beiden extremen Formen zu denken sei. Nach der Ansicht von Goette und Moser ist die ventrale Anlage als die ursprüngliche anzunehmen, aus der dann durch Uebernahme einer ursprünglich fremden hydrostatischen Funktion die auf die dorsale Seite wandernde Schwimmblase hervorging. Eine derartige Wanderung wurde am Luftsack des Ceratodus direkt beobachtet. So ist es also wahrscheinlich, daß die ventralen Luftsäcke von Polypterus die gemeinsame Ausgangsform für Lungen und Schwimmblasen repräsentieren. Ueber die Abstammung der ventralen Luftsäcke hat sich Goette zuerst 1875 auf Grund entwickelungsgeschichtlicher Tatsachen ausgesprochen. Er leitet sie von Umbildungen der hinteren Darmkiementaschen (d) ab, die er zuerst bei Amphibien (Fig. 41) beobachtete. Auch beim Flußneunauge (Fig. 42) hat er diese wiederum

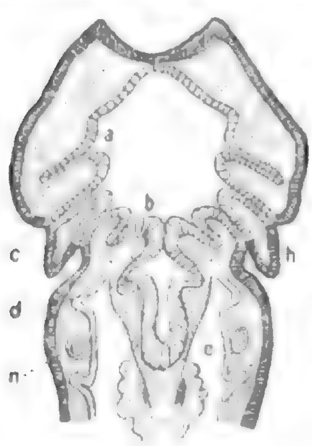


Fig. 41. Anure. Frontalschnitt durch den Körper einer jungen Larve. a erste Kiementasche, b letzte (5.) Darmkiementasche, c Kiemenspalte, d Lungenanlage, e Cölom, h Hautkiemen, n Vorniere. Nach Goette.

gefunden. Diese auf Grund von entwickelungsgeschichtlichen Tatsachen aufgebaute Hypothese Goette's war aber vollständig in Vergessenheit geraten, bis Spengel 1904 ohne sich auf eigene Beobachtungen zu stützen, sie weiter auszubauen versuchte, dabei aber die von Goette gefundenen entwickelungsgeschichtlichen Tatsachen ganz außer acht ließ (s. Goette 1905). Durch neuere Untersuchungen hat dann Goette derartige Kiementaschenpaare wie sie bei Amphibien den Lungen entsprechen, auch bei Ammocoetes nachgewiesen, die aber hier als rudimentäre neunte und zehnte Taschen aufzufassen sind (Fig. 42), während es bei den Amphibien die sechste Kiementasche ist. Es läßt sich hier also eine sukzessive Rückbildung der Kiementaschen nachweisen — die zehnte ist schon schwächer entwickelt

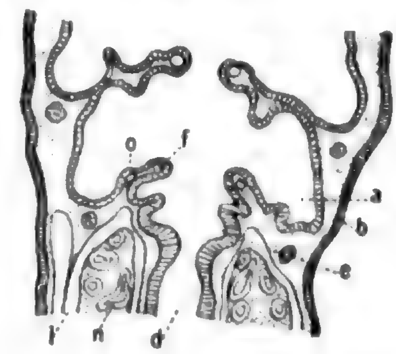


Fig. 42. Ammocoetes. Frontaldurchschnitt durch die hintere Kiemengegend eines jungen Tieres. a letzte (8.) Kiementasche, b. c, 9. und 10. Kiementasche, d Speiseröhre, c Cölom, f Scheidewand zwischen 8. und 9. Tasche, n Vorniere, o letzter Kiemengefäßstamm. Nach Goette.

als die neunte, — die auch namentlich bei den Selachiern bekannt geworden ist. So steht also der Annahme keine Schwierigkeit im Wege, daß die Rückbildung der Darmkiementaschen die sechsten erreichte, die dann den Lungen ihren Ursprung gaben.

Die Lungenatmung hat zunächst wahrscheinlich nur als Ergänzung der Kiemenatmung gedient, wie jetzt noch die Schwimmblasenatmung bei den Lurchfischen. Bei dem Uebergang zum rein terrestrischem Leben wurde dann die Lunge allmählich zum alleinigen Respirationsorgan. Bei allen Amphibien und auch den Amnioten entsteht die Lunge als paarige Aussackungen der seitlichen Schlunddarmwand, aus denen dann die paarigen Lungensäcke auswachsen. Diese Säcke sind zunächst mit dem Darm durch kurze röhrige Ansatzstücke (Fig. 43, A bis C) verbunden, die man als die primitiven Bronchien (Br) bezeichnet. Letztere fließen zu einem unpaaren Stück zusammen, der späteren Trachea (Tr), die an ihrer Einmündungsstelle in das Lumen des Schlunddarmes den Kehlkopf oder den Larynx (La) bildet. Der Lungensack ist also das phylogenetisch ältere Gebilde, die Bronchien, die Trachea und der Kehlkopf sind als jüngere Erwerbungen anzusehen. Diese entwickelungsgeschichtliche Tatsache findet auch in der vergleichenden

Anatomie ihre Bestätigung. Der gemeinsame Abschnitt, die Trachea, ist bei den Amphibien noch außerordentlich kurz, erst von den Reptilien an kommt es zu einer gemeinsamen Trachea, die sich in zwei zu den Lungen führende Röhren, die Bronchien, spaltet.

β) Kehlkopf. Trachea. 1. Amphibien und Reptilien. Es sei zunächst

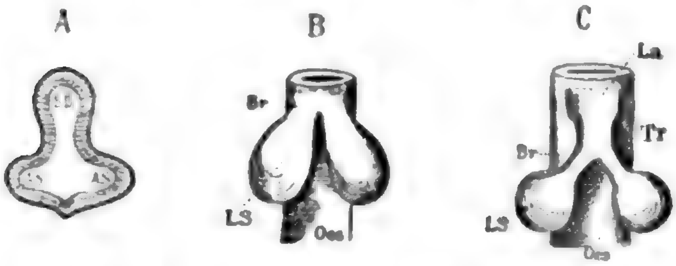


Fig. 43. A Lungenanlage bei Amphibien und Schildkröten. Querschnitt. SD primärer Vorderdarm, AS seitliche Aussackung desselben. B, C spätere Entwickelungsstadien, in welchen es zur allmählichen Herausbildung eines Lungensackes (LS), primitiver Bronchien (Br), einer Trachea (Tr) und eines Kehlkopfes (La) kommt. Oes Oesophagus. B und C stellen die Vorderansicht dar. Alle Figuren sind schematisch gehalten. Nach Wiedersheim.

auf die zuführenden Luftwege, besonders auf den Kehlkopf, eingegangen. Schon bei den Amphibien sind in dem kurzen gemeinsamen Abschnitt der Lungen zwei stützende Knorpelstücke eingebettet, die als Reste der siebenten Schlund- oder der fünften Kiemenspalte anzusehen sind. Jederseits sind außerdem noch stäbchenförmige Knorpel, die Cartilagines laterales, vorhanden, die das primitivste Laryngotracheal-Skelett darstellen. Die Cartilago lateralis erfährt nun schon bei den Urodelen mannigfachste Fortentwickelungen, indem sich der vordere Abschnitt zu den sogenannten Gießbecken- oder Stellknorpeln (Cartilagines arytaenoidea), der hintere zum Crico-trachealskelett abgliedert. Das vorderste Ende des letzteren gestaltet sich bei den Urodelen zu einem einfachen Ringknorpel (Cartilago cricoidea), an welche sich die noch sehr kurze Trachea anschließt. Bei den Amnioten wird die Trachea immer länger und die knorpeligen Ringe setzen sich auf ihr fort, um ein kollabieren zu verhindern. Bei den Anuren (Fig. 44) ist der Kehlkopf schon höher ausgebildet, indem namentlich der Ringknorpel zu größerer

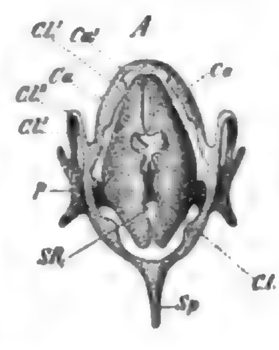
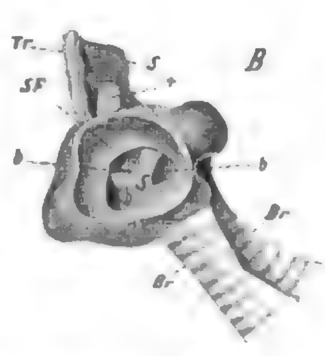


Fig. 44. Rana esculenta. Knorpeliges Kehlkopfgerüst Von oben gesehen. Ca, Ca' Cartilago arytaenoidea, Cl, Cl[1] bis Cl[4] Cartilago cricoidea, p plattenartige Ausbreitung des ventralen Teils der Cartilago cricoidea. Sp spießartiger Fortsatz der Cartilago cricoidea, SR Stimmritze. Nach Wiedersheim.

Entfaltung gelangt ist. Er wird hier zu einem mit schwingenden Membranen (Ligamenta vocalia) versehenen Stimmorgan, das in der Amniotenreihe weitere Vervollkommnungen erfährt. Von den Amphibien an bis zu den Säugern hinauf kommen am Kehlkopf zwei Muskelgruppen vor, die zum Teil sich aus der Rumpfmuskulatur herleiten, zum Teil branchialen Ursprungs sind. Sie bestehen aus einem Erweiterer und einem Verengerer der Stimmritzen.



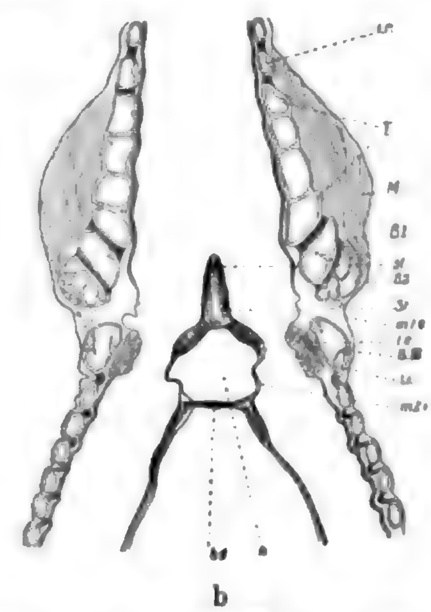


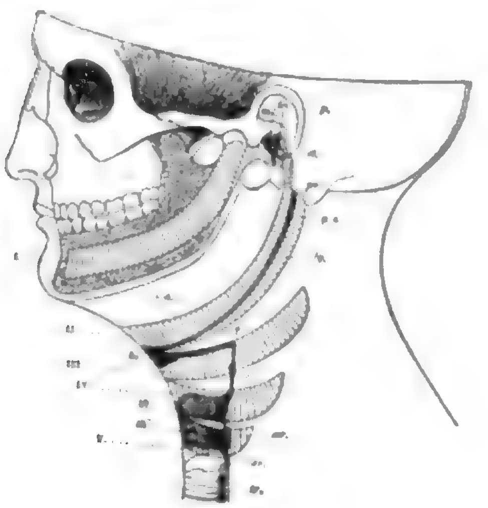
Fig. 45a. Der untere Kehlkopf der männlichen Ente. Innere Ansicht. Br Bronchus, s Steg, von welchem ein Seitenausläufer (S zwischen den bb) in die Trommelhöhle hineinragt. Dadurch wird deren Kommunikationsöffnung mit der Trachea in zwei Abschnitte (bb) getrennt, außerdem wird jene durch die ringförmige Schleimhautfalte SF sehr beschränkt, Tr Trachea, t dünne Stelle im Steg. Nach Wiedersheim.

Fig. 45b. Schnitt durch den Syrinx einer männlichen Amsel (Turdus merula). bd Bronchidesmus, BI, BII, BIII erster bis dritter Bronchialring, h ventralwärts offener Hohlraum (Abschnitt des vorderen thoracischen Luftsackes), le Labium externum, l.i Labium internum, M Muskulatur, m.t.e Membrana tympaniformis externa, m.t.i Membrana tympaniformis interna, se Membrana semilunaris, T Trommel, T.r Trachealring. Nach V. Häcker.

Die Reptilien zeichnen sich schon durch eine größere Vervollkommnung der Trachealknorpelringe aus, die aber dorsalwärts noch offen bleiben können. Die Länge der Trachea hängt von der Länge des Halses und der höher oder tiefer erfolgenden Spaltung in Bronchien ab. Die Cartilago cricoidea ist ungleich schärfer differenziert, auf ihr sitzt wie auf einem Stativ der Aryknorpel beweglich auf.

2. Vögel. Eigenartige Verhältnisse in bezug auf Kehlkopf und Trachea stellen die Vögel dar. Es sind hier zwei Kehlköpfe zu unterscheiden, ein oberer und ein unterer. Der erstere ist denjenigen der übrigen Vertebraten homolog, er ist aber nicht zur Lauterzeugung geeignet. Er ist auch nicht höher differenziert als der der Reptilien. Die Knorpel der Luftröhre sind meist verknöchert, wie denn auch die Luftröhre gewöhnlich eine sehr große Länge besitzt. Der untere Kehlkopf oder der Syrinx liegt an der Gabelung der Trachea in die Bronchien und dient zur Stimmbildung. Er ist als eine in der Reihe der Vögel erst erworbene Einrichtung anzusehen. Der Syrinx ist charakterisiert durch schwingende elastische Membranen (Fig. 45, a u. b, mt. e. m. t. i., se) (Membrana typaniformis interna und externa), die aus Differenzierungen des elastischen Gewebes der Bronchialwand hervorgegangen zu denken sind. Durch Verschmelzung einer Anzahl der untersten Trachealringe kommt ein weiteres Gebilde, die Trommel (T), zustande, die als Resonanzapparat funktioniert. Gewöhnlich ist eine komplizierte Muskulatur vorhanden, die die Trommel umgreift und vom Hypoglossus und Cervikalnerven innerviert wird. An der Spaltungsstelle der Trachea in die Bronchien liegt ein öfters verknöchernder Steg; zwischen ihm und der Trommel ist eine Falte, die Membrana semilunaris, ausgespannt (für weitere Einzelheiten verweise ich auf die Arbeit von Haecker). Die Stimme kommt so zustande, daß die beiden Membranae typaniformes bei gewissen Bewegungen der Trachea in deren Lumen vorspringen und so auf jeder Seite des Steges eine Stimmritze begrenzen. Durch den vorbeipassierenden Luftstrom werden sie dann in Schwingungen versetzt. Infolge der geschlechtlichen Zuchtwahl ist bei den mit stärkeren und melodischen Stimmen versehenen Männchen der Syrinx zu höherer Entfaltung gekommen.

3. Säuger. Bei den Säugetieren erreicht nun der Kehlkopf seine höchste Entfaltung, indem drei weitere Schlundspangen in den Dienst der Luftwege treten (Fig. 46 a). Die vierte und fünfte verschmelzen zu dem Thyreoid- oder Schildknorpel, der sich dem primitiven Kehlkopf aufsetzt, damit wird der stimmbildende Abschnitt in die Tiefe versenkt und vor Verletzungen geschützt. Die sechste Schlundspange bildet sich zum Kehldeckel (Epiglottis) um. Auch der Zungenbeinapparat tritt in nahe Beziehung zum



a



b

Fig. 46a. Derivate der Bronchialbögen beim Menschen. I bis V erster bis fünfter primordialer Kiemenbogen. I. Bogen = sog. Meckel'scher Knorpel, daraus entstehen proximalwärts Hammer (ml), und Amboß (m), p Ohrmuschel, st Steigbügel, pr Processus mastoideus. II. Bogen = Zungenbein- oder Hyoidbogen; daraus gehen hervor: proximalwärts der Processus styloideus (p. s.), distalwärts die kleinen Zungenbeinhörner (c. a.), und ein Teil der Copula (bs), d. h. des Zungenbeinkörpers. Der weitaus größte Abschnitt wird zum Ligamentum stylo-hyoideum (lg), III. Bogen: daraus gehen hervor: der größere Teil des Zungenbeinkörpers (bs) und das große Horn des Zungenbeins (c. p.). Die Cartilago triticea (tc) und die großen Hörner des Schildknorpels stellen einen Rest der einstigen Verbindung des Hyoid- und Thyreoidapparates dar. IV. Bogen: daraus entwickelt sich der obere Abschnitt (th') der Cartilago thyreoidea. V. Bogen; unterer Abschnitt (th'') des ebengenannten Knorpels, ar Aryknorpel, cr Cartilago cricoidea, tr Trachea. Nach Wiedersheim).

Fig. 46b. Kehlkopf des Brüllaffen (Mycetes ursinus). Von der linken Seite gesehen. Cr vordere, Cr[1] hintere zur Platte erhobene Spange des Ringknorpels, Ct Cartilago thyreoidea, Ep Epiglottis, H Zungenbeinkörper, Lt Ligamentum cricothyreoideum, M.ge Musculus genioglossus, Mth Ligamentum thyreohyoideum, oh, uh obere und untere Hörner der Cartilago thyreoidea, Tr Trachea, z Zunge. Nach Wiedersheim.

Kehlkopf, namentlich dem Schildknorpel: Verhältnisse, die bei den Reptilien schon angebahnt sind. Bei den Monotremen sind sogar noch Hyoid und Thyroidelemente zu einem einheitlichen Apparat verbunden. Bei den höherstehenden Säugern ist in postembryonaler Zeit die innige Vereinigung dieses Hyoid- und Thyreoidapparates nicht mehr vorhanden. Die in der Mittellinie ventralwärts miteinander verwachsenen Schildknochenplatten zeigen einen einheitlichen Charakter und umgreifen ventral und lateral das Cavum laryngis (Fig. 46 b) und bedecken teilweise den Ringknorpel. Die Stimmbänder spannen sich zwischen Schild- und Gießbeckenknorpel aus. Ueber ihnen buchtet sich die Schleimhaut zu den Morgagnischen Taschen aus, die bei manchen Primaten (Gorilla, Troglodytes) besonders mächtig werden und als Schallblasen dienen.

Die Ventriculi laryngis (Morgagnische Taschen) werden von oben her von Schleimhautfalten begrenzt, die als Ligamenta vocalia falsa bezeichnet werden.

Bei den luftatmenden Wirbeltieren macht sich nun in der steigenden Reihe eine Einrichtung bemerkbar, die die Atmung von der Speisezufuhr unabhängig zu machen sucht. Bekanntlich tritt schon von den Amphibien an die Nase in den Dienst der Respiration, indem innere Nasenöffnungen, die Choanen, gebildet werden, die zunächst weit vorne im Mund gelegen sind. Schon bei den Reptilien und Vögeln macht sich nun ein Prozeß der Verlagerung dieser Choanen nach hinten zu bemerkbar, während sie gleichzeitig median nahe aneinander rücken und durch seitlich sich verschiebende Schleimhautfalten zu einer einheitlichen Spalte gemacht werden. Gleichzeitig macht sich ein Prozeß des Vorschiebens des Kehlkopfes nach vorn zu geltend, so daß schließlich Choanen und Kehlkopf einander gegenüber liegen (Fig. 47). So entsteht eine in der Reihe der Reptilien sich schon anbahnende direkte Verbindung zwischen den nasalen Luftwegen und dem Larynx. Schließlich kommt noch eine Pharyngo-Nasaltasche zustande, die eng an die Bildung des weichen Gaumens geknüpft ist. Indem der Larynx gegen die Choanen mehr oder weniger weit emporwächst, kann er sich in die eben genannte Tasche einlagern, wobei er von der Muskulatur des weichen Gaumens zwingenartig umfaßt wird. Diese konstante Verbindung ist namentlich für diejenigen Säugetiere wichtig, die im unreifen Zustande geborene Junge haben, die noch nicht eigene Saugbewegungen ausführen können (Marsupialier). Die Muttermilch wird ihnen dann durch den Musculus compressor mammae zugeführt und die Milch kann ohne Behinderung des Atmungsprozesses um beide Seiten des Kehlkopfes herumgeführt werden. Bei den Primaten berühren sich weicher Gaumen und Kehldeckel nicht, die Nahrung wird unter Verschluß des Kehlkopfes direkt in den Schlund befördert.

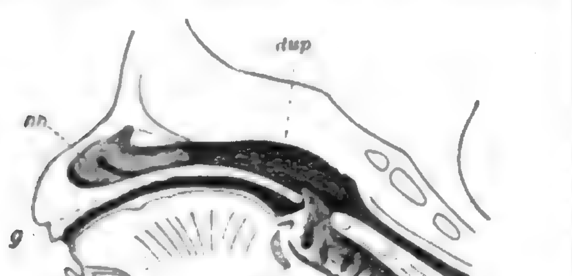


Fig. 47. Senkrechter Medianschnitt durch den Gesichtsteil des Kopfes von Ateles Geoffroy. Nach C. Gegenbaur. nh Nasenhöhle, dup Nasenrachengang, g Gaumen, z Zunge, ep Epiglottis, tr Trachea, oe Oesophagus. Nach Haller.

γ) Lunge. Wie wir gesehen hatten, entstehen die Lungen als paarige Säcke aus dem Schlunddarm, infolgedessen ist ihre innere Auskleidung entodermal, während sie von außen her von Mesoderm umgeben sind. Von dem ursprünglichen einheitlichen zentralen entodermalen Hohlraum, entstehen Aussackungen oder Knospen, welche in das umgebende mesodermale Gewebe hineinwuchern. Diese Wucherung geht immer weiter, so daß ganze Bäumchen von hohlen Kanälen, d. h. Bronchien zweiter, dritter usw. Ordnung mit kolbig angeschwollenen Enden (Alveolen) entstehen (Fig. 48). Die Bronchien sind mit Flimmerepithel bedeckt, wie auch die Trachea, während die Alveolen Plattenepithel besitzen. Durch diesen komplizierten Sprossungsprozeß kommt es nun zu

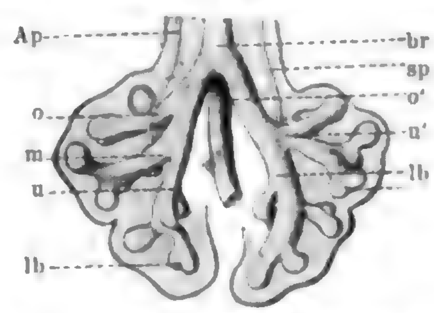


Fig. 48. Konstruktionsbild der Lungenanlage von einem älteren menschlichen Embryo. Vergrößerung 50 fach. Ap Arteria pulmonalis, lb Lungenbläschen in Teilung, lr Luftröhre, m, u mittlerer und unterer Lungenlappen der rechten Seite, o oberer Lungenlappen der rechten Seite mit zuführendem, epartiellem Bronchus, o' oberer Lungenlappen der linken Seite mit zuführendem hypartiellem Bronchus, sp Speiseröhre, u' linker unterer Lungenlappen. Nach W. His.

einer außerordentlichen Komplizierung der Lunge, die auch im hohen Maße durch weitgehende Oberflächenvergrößerung ihre Funktion befördert. Im großen und ganzen läßt sich dieser kurz geschilderte embryonale Verlauf der Lungenentwickelung bei höheren Tieren in der Vertebratenreihe von den Amphibien an auch vergleichend anatomisch verfolgen.

1. Amphibien. Den primitivsten Zustand der Lunge haben wir bei den Urodelen, namentlich den ständig kiemenatmenden. Aber auch bei den landlebenden Amphibien sind die Lungen noch nicht sehr hoch differenziert, da die Hautatmung und die später noch zu erwähnende Buccopharyngealatmung bei ihnen noch eine große Rolle spielt. Am tiefsten stehen die Lungen von Menobranchus und Proteus, bei denen dieselben innen noch völlig glatt sind (Fig. 49 a), also noch keine Oberflächenvergrößerung aufweisen. Die Lungen sind hier zwei schlanke Säcke, die in ihrem Mittelstück etwas eingeschnürt sind. Wenn nun die Lungenatmung an Intensität zunimmt, so werden auch die respiratorischen Gefäße stärker und legen sich wie die Reifen eines Fasses um den Lungensack herum (Fig. 49 b). Die Lungeninnenfläche ist dann zu einem der Gefäßverteilung entsprechenden Netzwerk umgewandelt, das viele glatte Muskeln führt. Indem sich nun die Gefäße immer mehr vergrößern, setzen sie den zentralen Lungenlumen von Stelle zu Stelle Hindernisse entgegen, wodurch septenähnliche Bildungen entstehen (Fig. 49 c). Die dazwischen liegenden dünnen Wände werden immer stärker nach außen vorgetrieben und die Lunge scheint dann nach außen hin mit halbkugeligen Erhebungen bedeckt zu sein. Die Innenfläche der Ausbuchtungen übernimmt nun immer mehr die respiratorischen Funktionen, während das zentrale Lumen eine luftzuführende Aufgabe hat. Es entsteht so ein einheitlicher intrapulmonaler Bronchus, der dem Stammbronchus der Lungen der Amnioten entspricht. Die wandständigen Aussackungen dagegen entsprechen dem Alveolensystem. Bei den Anuren zeigen die Lungen einen einfachen lobulären Bau (Fig. 49 c). Sie stellen elliptische Blasen dar, die in der Mitte einen Stammbronchus, der Flimmerepithel besitzt und wandständig blutgefäßführende respiratorische Alveolen haben, die nach dreifachem System ineinander geschachtelt sind.

2. Reptilien. Auch bei den Reptilien sind die Lungen noch nicht wesentlich höher entwickelt. Bei der Brückenechse sind noch sackförmige Lungen vorhanden, die noch nicht wesentlich höher differenziert sind als die der Amphibien. Im allgemeinen ist die äußere Gestalt der Lunge bei den Reptilien außerordentlich verschieden und richtet sich nach der jeweiligen Körpergestalt. Die höchste Entfaltung der Lungen treffen wir bei den Schildkröten und Krokodilen an, die als zusammengesetzt lobulär bezeichnet

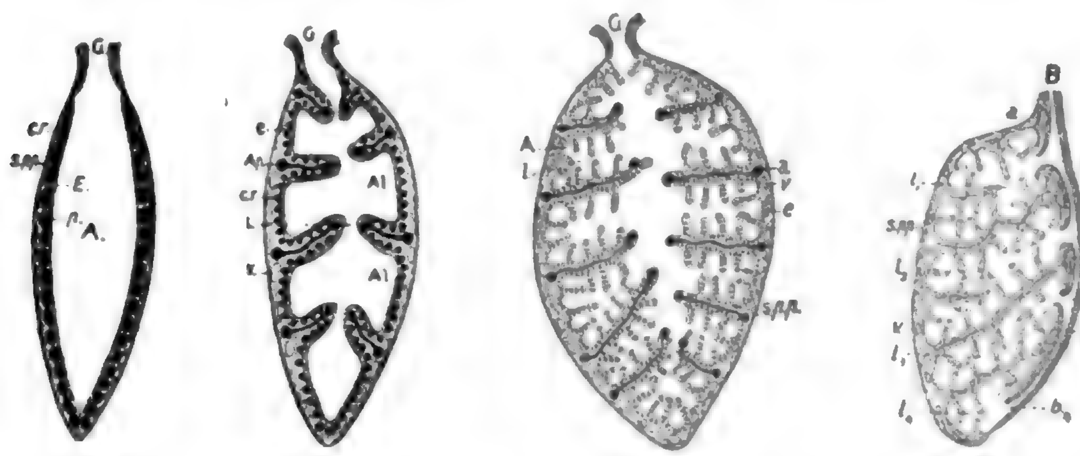


Fig. 49 a. Schema einer unialveolären Lunge (Proteus). G Glottis, A Lungenhöhle, entsprechend einer einzigen Alveole, E respiratorisches Epithel, p Deckplatten dieser Zellen, die Kapillaren überbrückend, cr respiratorische Kapillaren, spp Serosa pleuroperitonealis. Nach Renaut. Aus Oppel. b Schema einer lobulinären Lunge (Siren). G Glottis, Al Alveolenhöhlen, L respiratorischer Kanal, e Lungenepithel, cr respiratorische Kapillaren, Ap Gefäße, welche das Blut zuführen, V ableitende Venen. Nach Renaut. Aus Oppel. c Schema einer einfach lobulären Lunge (Rana). G Glottis, l dem „Lobulin" entsprechende Canaliculus respiratorius, A Alveolen, e Lungenepithel, a Arteria afferens, v Vene, spp Serosa pleuroperitonealis. Nach Renaut. Aus Oppel. d Schema einer zusammengesetzten lobulären Lunge (Testudo). B Bronchus, b_1, b_2, b_3, b_4 Mündungen der vier die Lunge bildenden Lobuli: diese sind die Homologa der Bronchioli, l_1, l_2, l_3, l_4 die vier einfachen Lobuli, e Lungenepithel, cr respiratorische Kapillaren, a Arteriae afferentes, v Venen, spp Serosa pleuroperitonealis, zurückgebogen auf die äußere Oberfläche der Lunge. Nach Renaut. Aus Oppel.

werden können (Fig. 49 d). Es setzen sich hier die intrapulmonalen Stammbronchien weit in das Innere des Organs hinein fort. Im Inneren der Lunge finden sich große Hohlräume, die mit dem Stammbronchus durch ein oder mehrere Oeffnungen in Verbindung stehen. Das Lumen der Lunge wird mit Ausnahme des hinteren Abschnitts von einer Anzahl von Scheidewänden durchzogen, die parallel der Längsachse des Organes und senkrecht dazu verlaufen. Die Lungen gemahnen so in ihrer Kompliziertheit schon an die gewaltige respiratorische Oberfläche der höheren Tiere. In ihren hinteren Abschnitten verlieren die Lungen zahlreicher Reptilien immer mehr ihre respiratorische Beschaffenheit. Es entstehen hier einfache glattwandige Luftsäcke, die nur spärlich durch Blut aus dem Körperkreislauf und nicht aus dem Lungenkreislauf versorgt werden. Es handelt sich um Gebilde, die in mancher Hinsicht an die gleich zu besprechenden Luftsäcke der Vögel erinnern.

3. Vögel. Eigenartige, aber hoch komplizierte Verhältnisse bieten die Vogellungen dar. Sie sind, obwohl nur wenig umfangreich im Vergleich zum mächtigen Thorax, dennoch physiologisch die Leistungsfähigsten sämtlicher Respirationsorgane. Sie liegen fest den Brustwirbeln und Rippen angepreßt und besitzen nur eine geringe Erweiterungsfähigkeit. Es ist wieder ein Stamm- oder Hauptbronchus vorhanden, der von der Mitte der hinteren ventralen Lungenfläche bis zur Mitte des ganzen Organs verläuft. Dabei gabelt er sich jederseits in Nebenbronchien, die eine teils ventrale, teils dorsale und laterale Lage haben. Von diesen Nebenbronchien entspringen einander parallel laufend die eigentlichen respiratorischen Abschnitte, die Lungenpfeifen (Fig. 50) oder Parabronchien. Ihre dicke Wandung besteht ganz aus respiratorischem Gewebe und wird radiär von dichotomisch sich teilenden Kanälen durchsetzt, die von flachem respiratorischem Epithel ausgekleidet sind. Die Kanäle lösen sich wieder in Luftkapillaren auf, die bei guten Fliegern mit den benachbarten Lungenpfeifen in Verbindung treten. Es entsteht so ein feines zusammenhängendes Maschenwerk von Luftkapillaren, dessen Lückenräume von Blutkapillaren aufs engste durchflochten werden. Dadurch, daß sämtliche Luftwege der Vogellunge miteinander anastomosieren, kommt eine Ausnutzung des beanspruchten Raumes zustande, wie sie sonst bei keinem System erreicht wird.

An den Lungen kommt es nun ähnlich wie bei einigen Reptilien zur Ausbildung von dünnwandigen Anhängen, die blutgefäßarme Ausstülpungen des Lungensackes darstellen. Es sind das die Luftsäcke (Fig. 51), die beim erwachsenen Tier durch Branchialäste in Form von fünf Oeffnungen an der freien ventralen Fläche jeder Lunge aus-

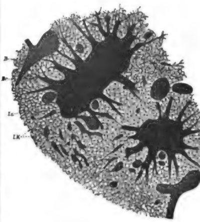


Fig. 50. Zwei Lungenpfeifen von Habropyga castanotis, Gelatineinjektion. 115fach vergrößert. Reduziert auf $^3/_4$. Die Lungenpfeifen (Lu) zeigen die typische Verästelung in Bronchioli (Br) und Luftkapillaren (LK), welche bei dem guten Flieger allseitig netzartig miteinander verbunden sind. Charakteristisch ist der Reichtum relativ großer Blutgefäße (B) auf der kleinen Fläche, ein Befund, der sich auch bei anderen kleinen Vogelarten konstatieren läßt. Nach G. Fischer.

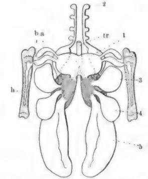


Fig. 51. Schematische Darstellung des Verhaltens der Luftsäcke zur Lunge (schraffiert) eines Carinaten. 1 Sacci claviculares, a clavicularer, b extraclavicularer Fortsatz, 2 Sacci cervicales, 3 vordere, 4 hintere diaphragmatische Säcke, 5 Abdominalsack, h Humerus. Nach Haller.

münden. Die Luftsäcke stellen ein System von Hohlräumen dar, die sich nicht nur zwischen den Eingeweiden ausbreiten, sondern auch in Mundhöhle und Knochen eindringen. Nach F. E. Schulze setzen sich die zirkulären Bronchialmuskelschichten auf die Ostia der Luftsäcke fort und bilden hier Sphincteren, die bei der Regulierung dei Luftpassage eine wichtige Rolle spielen. Die Luftsäcke dienen, da sie gefäßarm sind, nicht zur Vergrößerung der Atmenfläche, sondern zur Luftaufspeicherung. Sie besorgen, da sie wie Blasebälge oder Ventilatoren wirken, die Durchlüftung der Lunge, die infolge ihrer eingekeilten Lage und ihrer Elastizität nur wenig erweitert und verengt werden kann. Die eigentliche Respiration oder der Gasaustausch erfolgt also nur in der Lunge selbst vermittels der Luftsäcke. Im ganzen sind fünf Paar Lungensäcke vorhanden. Die cervikalen Säcke gehen von der dorsalen Seite der Säcke des vorderen Lungenendes ab, sie liegen mit ihren Fortsätzen seitlich vom Halse, dringen in die Wirbel ein und gelangen so bis an den Kopf. Die clavikularen Säcke verwachsen median miteinander, sie nehmen den prothoracalen Raum ein, reichen bis zur Herzbasis und setzen sich mit der Brustbeinhöhle in Verbindung. Ein axial-lateraler Fortsatz gelangt zwischen die Muskeln der vordersten Extremität, ein humeraler verbindet sich mit den pneumatischen Höhlen der Flügelknochen. Zu den diaphragmatischen Säcken gehört je ein vorderer und ein hinterer thoracaler Sack: die bei weitem größte Ausdehnung besitzt der abdominale Sack, der weit zwischen den Eingeweiden, diese medianwärts verschiebend und dadurch eine statische Wirkung hervorrufend, bis in das Becken hinein reicht. (Genaueres über die Luftsäcke s. F. E. Schulze. 1912.)

4. Säuger. Die Lungen der Säugetiere entfalten sich ontogenetisch genau so wie die der Amphibien aus primären Säckchen, die von mesodermalem Bindegewebe umgeben sind und sich in diese zu verästeln beginnen. Dabei erfolgt ein Längenwachstum von dem ursprünglichen Sackende aus und der schmal gewordene Sack treibt laterale, später latero-dorsale Sprossen. Diese Sprossen wachsen dann wieder und verästeln sich. Jedoch kommt es hier nicht wie bei den Vögeln zu einem System allseitig miteinandei kommunizierender Luftkapillaren, sondern die sich immer feiner verteilenden Luftwege führen zu blind endigenden Läppchen, deren respiratorischer Teil aus einer großen Zahl mehr oder minder halbkugeligen Alveolarsäckchen besteht (Fig. 52). Sie kommunizieren durch einen gemeinsamen Raum, dem Atrium mit dem Alveolargang, dieser Gang geht dann in die Bronchioli über, die dann wieder ihrerseits in die Bronchien eintreten. Die Hauptbronchialäste sind wie die Trachea mit Knorpelringen zur Stütze versehen und mit einem Flimmerepithel ausgekleidet. In den Bronchioli wird das Epithel flacher und besitzt keine Flimmern mehr. In den Alveolen endlich ist das Epithel ganz flach, kernlos, plattenförmig geworden und außerordentlich schwer zu erkennen. Mit den Bronchien treten in die Lunge die Aeste der Arteria pulmonalis ein, verzweigen sich dichotomisch und gehen in die sekundären Lungenläppchen über (Fig. 52). Die feinsten

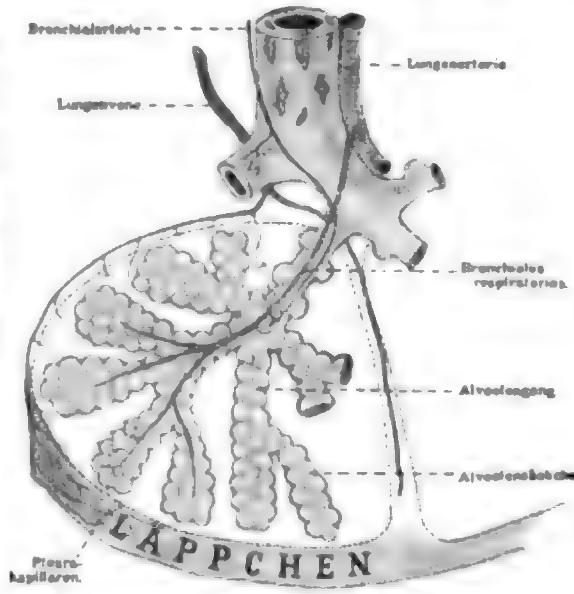


Fig. 52. Schema der Endverästelungen des menschlichen Bronchialbaumes und seiner Blutgefäße + Lungenvene, Blut aus Bronchialgefäßen aufnehmend. Nach Stöhr.

Lobulararterien gehen an die Luftbläschen heran und lösen sich in das Kapillarnetz der Lungenbläschen auf. Aus diesem Kapillarnetz gehen die Lungenvenen hervor, die mehr oberflächlich liegen und das arteriell gemachte Blut dem linken Vorhof des Herzens zuführen. An den Bronchen verlaufen außerdem noch ernährende Bronchialarterien (Fig. 52).

Die Lungen nehmen bei den Säugern den Thorakalraum ein, von dem kaudalwärts die hintere Leibeshöhle durch das Zwerchfell (Diaphragma) abgegrenzt wird, das nur bei den Säugetieren in vollständiger Ausbildung vorhanden ist Die beiden Lungen fassen das Herz mit dem Perikard zwischen sich. Die Lungen selbst wie auch der Herzbeutel und die Pleurahöhle sind von dem Peritoneum um- bezw. ausgekleidet.

Zu den Atmungsorganen in Beziehung stehen bei den Wirbeltieren noch einige Drüsen, die, obwohl sie für die Respiration keine Rolle spielen,

doch von außerordentlich großer Bedeutung sind. Es sind dies Schilddrüse und Thymus.

Die erstere, die Glandula thyreoidea, entsteht als ein medianer Auswuchs der ventralen Kiemenhöhlenwand, die Anlage erstreckt sich über die Gegend der ersten vier oder fünf Branchialspalten. Bei Ammocoetes steht das mit einfachem Flimmerepithel ausgekleidete Organ noch mit dem Pharynx zwischen der dritten und vierten Kiemenspalte in offener Verbindung. Nach A. Dohrn und W. Müller ist dieses Organ mit dem Endostyl der Tunicaten und dem Amphioxus homolog. Bei allen höheren Wirbeltieren verödet der Ausführungsgang und die Drüse wird zu einem Haufen von einzelnen Follikeln. Die Drüse wird jetzt zu einer solchen mit innerer Sekretion, deren Hauptrolle die Produktion einer jodhaltigen Eiweißverbindung ist.

Die Glandula thymus ist erst von den Selachiern an zweifellos nachgewiesen. Sie entsteht hier als paarige entodermale Epithelwucherung im oberen Winkel der ersten fünf Kiemenspalten. Wahrscheinlich haben sich ursprünglich alle Kiementaschen an der Entwickelung des Organs beteiligt. Für die Anlage der Säugerthymus kommen die drei bis vier vordersten Schlundtaschen in Betracht. Bei Menschen wächst die Thymus bis zum 14. und 16. Jahre, wo sie ihren Höhepunkt erreicht; sie verliert dann allmählich an Gewicht und mit beginnendem Alter, von 50 bis 60 Jahren an, erleidet sie eine Involution. Ueber die physiologische Bedeutung des Thymus ist nichts Sicheres bekannt.

Außerdem müssen hier noch die Bronchialdrüsen erwähnt werden, die einen alveolo-tubulösen Bau haben und in den Bronchien, soweit der Knorpel reicht, vorkommen. Sie dienen zur Feuchterhaltung der Atemwege mittels eines schleimigen Sekretes.

5. Einrichtungen bei den Tieren, die die Mechanik des Atmens ermöglichen.

5a) Wirbellose Tiere. Bei dem Prozeß der Atmung ist es wichtig, daß das respiratorische Medium möglichst vollkommen mit den Respirationsorganen in Berührung kommt und auch ein möglichst intensiver Wechsel der betreffenden verbrauchten Medien stattfinden kann. Bei Tieren mit Hautatmung oder sonst wenig ausgeprägten Atmungsorganen kann der Körper entweder dadurch immer wieder mit neuem Atemwasser in Berührung gebracht werden, daß er sich selbst schnell bewegt, oder dadurch, daß Teile des Körpers in ständiger rhythmischer Bewegung sich befinden. Viele kleinere Würmer, die sich sehr schnell bewegen können, besitzen nur Hautatmung: hier ist die eigene schnelle Beweglichkeit ausreichend für den Atemmechanismus. Manche im Schlamm lebende Würmer ohne Atmungsorgane dagegen stecken einen Teil ihres Körpers aus dem Schlamm hervor, um durch rhythmische Bewegung immer neues Atemwasser an die Haut heranzubringen. Schließlich ist bei vielen anderen Tieren die Oberfläche der Respirationsorgane dicht mit kräftigen Wimpern besetzt, wodurch beständig ein Wasserstrom an den Organen vorbei getrieben wird.

Bei den Arthropoden, wo besonders hoch entwickelte Atmungsorgane vorhanden sind, ist die Erneuerung des Atemwassers leicht zu erzielen, wenn die Atmungsorgane an den Extremitäten entwickelt sind. Bei diesen tritt ein Funktionswechsel derart ein, daß die Lokomotionsfähigkeit einfach in den Dienst der Atmung übernommen wird. So erzeugen z. B. die Decapoden den Atemwasserstrom für die Kiemen durch schwingende Anhänge der 2. Maxille. Schwieriger ist der Atmungsprozeß bei den Tracheaten zu verstehen. Die Atmung geschieht hier durch abwechselnde Zusammenziehungen und Erweiterungen des Hinterleibes, bisweilen auch unter geringer Beteiligung des Thorax. Die Decken des Hinterleibes werden meist durch Muskeltätigkeit gesenkt und dann durch die Elastizität des Chitinskeletts wieder gehoben. Dadurch kommt eine rhythmische Bewegung zustande, die oft, z. B. bei Heuschrecken und Libellen, von dem Oeffnen und Schließen der Stigmen begleitet wird. Die Hymenopteren atmen durch Verlängerung und Verkürzung des Hinterleibes. Die Erweiterung des Hinterleibes dient der Einatmung, indem die elastischen Tracheen sich ebenfalls erweitern. Die Verengerung des Hinterleibes kann dagegen eine doppelte Wirkung haben. Geschieht die Zusammenziehung bei geöffnetem Stigma, so wird die Luft nach außen gepreßt, dagegen wird sie bei verschlossenem Stigma in die feinsten Verzweigungen der Tracheen hineingedrückt. Dort wo die Atmungsorgane in Zusammenhang mit dem Rektum stehen, z. B. bei den Holothurien, wird die Erneuerung des Atemwassers durch rhythmische Bewegung der Kloake besorgt.

5b) Wirbeltiere. *a*) Fische und Amphibien. Komplizierter sind die mechanischen Atmungseinrichtungen bei den Wirbeltieren. Bei den niedersten Formen wird auch hier noch das Atemwasser vermittels Wimperschlag durch den Darm hindurch getrieben. Bei den Fischen, namentlich den Teleostiern, ist schon ein sehr komplizierter Atemmechanismus vorhanden. Im allgemeinen erfolgt die Inspiration dadurch, daß der Operkularapparat abgehoben wird (Fig. 53, A und B) und gleichzeitig durch eine entgegengesetzte Bewegung der Branchiostegalmembran eine Erweiterung der Mundhöhle zustande kommt, wobei die Maxillar- und Mandibularklappen wie die Flügel einer Klapptür durch den Wasserstrom auseinandergehen. Darauf wird die Mundhöhle durch Zusammenziehung des Operkularapparates verengt und durch den Druck des

Wassers wird die Maxillar- und Mandibularklappe geschlossen, worauf dann das Wasser durch die sich gleichzeitig abhebende Branchiostegalmembran, die gleichfalls klappenartig funktioniert, abströmt. Die Funktion der Mundhöhle beim Atmen ist etwa die einer Pumpe.

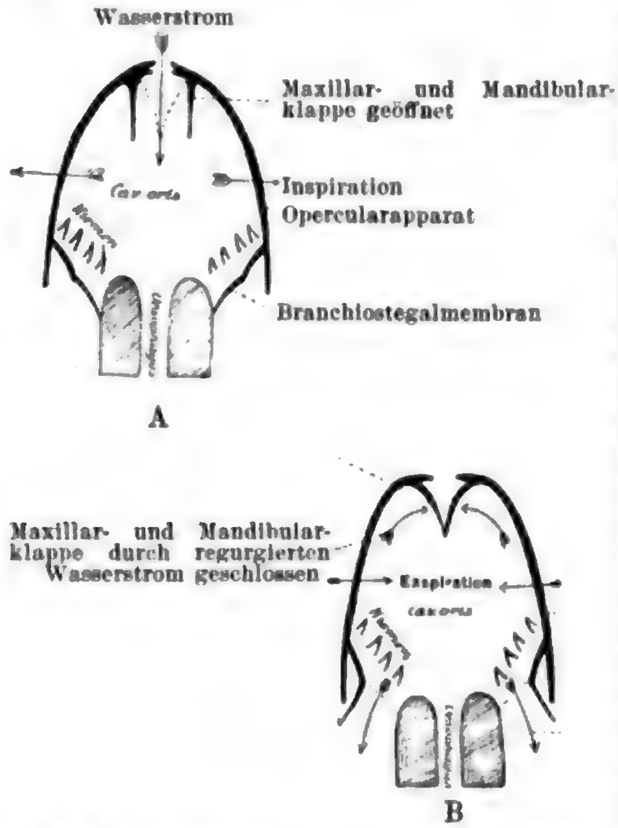


Fig. 53. Mechanismus der Teleostieratmung. Schematisch dargestellt. A Inspirations-, B Exspirationsphase. Bei beiden Figuren ist der vordere (Mund-)Teil senkrecht, der hintere (Kiemen-)Teil horizontal geschnitten zu denken. Die Pfeile in der Mund- und Kiemenrichtung deuten die Wasserpressungen, diejenigen, welche quer durch die Außenwände des Cavum oris gelegt sind, die Ausdehnung oder Zusammenziehung des Operkularapparates an. Nach Dahlgren. Nach Wiedersheim.

Die Kiemenatmung verläuft bei den Amphibien ganz ähnlich wie bei den Fischen. Die Inspiration geschieht durch Oeffnen des Mundes, Senken des Bodens der Mundhöhle und Heben des seitlichen Teiles des Kiemenkorbes, die Exspiration unter den entgegengesetzten Bewegungen. Auch die Kiemen selbst sind vermöge einer komplizierten Muskulatur beweglich.

Bei den landlebenden Urodelen und den Anuren tritt zum ersten Male die Lungenatmung auf, die aber noch wesentlich durch Buccopharyngealatmung unterstützt wird. Der Atemmechanismus weicht noch vollständig von dem der höheren Wirbeltiere ab. Er sei kurz nach E. Gaupp und S. Baglioni geschildert.

Bei den Amphibien fehlen Rippen und Zwerchfell noch fast vollständig. Die Lungen können also nicht durch Ansaugen mit Luft gefüllt werden. Bei der gewöhnlichen Atmung finden nun alle Respirationsbewegungen bei geschlossenem Munde statt, vermittels eines Druckmechanismus. Die Atmung verläuft im einzelnen auf folgende Weise. Zuerst wird bei geschlossenem Munde durch Senken des Mundhöhlenbodens die Mundhöhle mit Luft gefüllt, die Luft streicht hierbei nur durch die Nasenlöcher und Choanen hin und zurück. Der Aditus laryngis ist hierbei geschlossen, während die Nasenlöcher ständig offen sind. Diese oszillatorische Bewegung der Kehlgegend schafft also keine Luft in die Lungen, sondern steht im Dienst einer Mundhöhlen-Rachenrespiration. Daneben kommt nun noch eine eigentliche Atembewegung hinzu, die die Luft in die Lungen pumpt und sich je nach Bedürfnis in unregelmäßigen Intervallen vollzieht. Diese Atembewegung erfolgt z. B. beim Frosch und auch bei den Salamandrinen in folgender Weise: Zunächst wird durch Senken des Mundhöhlenbodens durch die geöffneten Nasenlöcher Luft in die Mundrachenhöhle bei geschlossenem Aditus laryngis eingeführt. Dieser Prozeß kann als Aspiration bezeichnet werden. Es folgt dann die Exspiration eines Teiles der in den Lungen enthaltenen Luft bei geöffnetem Aditus laryngis, hauptsächlich durch Kontraktion der Bauchmuskeln. Unmittelbar darauf erfolgt die Inspiration und zwar durch Verengerung der Mundrachenhöhle bei geschlossenen Nasenlöchern und geöffnetem Aditus laryngis. In dieser Phase wird also die Luft in die Lungen hineingepreßt. Die glatte Muskulatur der Lunge dient hier wie auch bei den Sauropsiden und Säugern lediglich dazu, eine Verkleinerung des Lungenbinnenraumes bei geschlossenem Aditus laryngis herbeizuführen, um die Luft in die randständigen Alveolen hineinzudrängen.

β) Vögel. Eine gesonderte Betrachtung erfordert der Atemmechanismus bei den Vögeln. Solange der Vogel nicht fliegt, ist der Mechanismus derselbe wie etwa bei den Reptilien, der Raum der Leibeshöhle wird durch die Bewegung der Rippen erweitert. Die Rippen bestehen hier aus einem vertebralen und einem sternalen Teil. Beide stoßen in einem Winkel beweglich aneinander (Fig. 54). Wenn nun der vertebrale Teil der Rippen nach vorn bewegt wird, wird der Querdurchmesser des Brustkorbes genau wie bei den Reptilien vergrößert, indem sich der Winkel zwischen den beiden Rippenabschnitten vergrößert und das gesamte Sternum von der Wirbelsäule entfernt wird. Die Bewegung der Rippen muß natürlich um so wirksamer sein, je größer das Sternum ist. Auf diese Weise wird abwechselnd die Leibeshöhle erweitert und verengt. Dabei wird aber im ersten Falle auch eine Erweiterung der Luftsäcke erzielt, die daraufhin Luft durch die Bronchien einziehen, was also dem Prozeß der Inspiration gleichkommen würde. Bei der Verengerung des Brustkorbes drückt das Sternum auf die

prall gefüllten Luftsäcke und treibt die Luft durch die Lungen nach außen. Bei dieser Ausatmung kann der etwa noch nicht verbrauchte Sauerstoff noch voll ausgenutzt werden. Damit ist also bei den Vögeln die Lunge lediglich in den Dienst der Respiration gestellt, während die Luftsäcke indirekt die

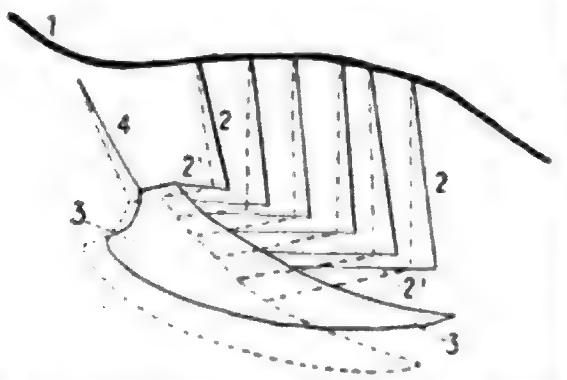


Fig. 54. Schematische Darstellung der Bewegung von Rippen und Brustbein bei der Atmung des Vogels. Exspirationsstellung ausgezogen, Inspirationsstellung punktiert. 1 Wirbelsäule, 2 vertebraler und 2′ sternaler Abschnitt der Rippe, 3 Brustbein, 4 Coracoid. Nach Hesse.

Ein- und Ausatmung besorgen. Infolge der außerordentlich hohen Ausnutzung der Atemluft brauchen die Vögel auch nur sehr wenig Atemzüge in der Minute zu machen. Die Taube 30 bis 60, der Kondor 6, Pelikan und Marabu nur 4 und der neuholländische Casuar sogar nur 2 bis 3 Atemzüge in der Minute.

Beim fliegenden Vogel muß nun der Atemprozeß ganz anders verlaufen, denn das Sternum bildet die Ansatzflächen für die mächtigen Flugmuskeln. Es kann also nicht beim Flug auf und ab bewegt werden, sondern wird durch die Feststellung der Rippen in seiner Lage fixiert. Die Luftversorgung geschieht nun ganz ohne das Zutun des Vogels, so wird es auch erklärlich, daß die Vögel sich andauernd schnell durch die Luft bewegen können, ohne außer Atem zu kommen. Um die Wahrheit dieser Tatsache experimentell zu beweisen, braucht man nur den Luftstrom eines Gebläses gegen die Nasenlöcher eines Vogels zu leiten. Der Vogel stellt dann seine Atembewegungen ein und lebt, ohne die geringste Atemnot zu zeigen, ruhig weiter, während sonst bei Behinderung der Atembewegung binnen sehr kurzer Zeit der Tod eintritt. Durch dieses Experiment haben wir auch gleichzeitig eine Erklärung dafür, weshalb der Vogel in der Luft nicht zu atmen braucht. Bei der großen Geschwindigkeit der fliegenden Vögel steht ein starker Luftstrom gegen ihren nach vorn gestreckten Kopf bezw. gegen ihre Nasenlöcher, dadurch werden die Luftsäcke aufgebläht. Es ist dann nur notwendig, daß von Zeit zu Zeit Luft aus den Säcken entleert wird und dieses geschieht wahrscheinlich durch Zusammenziehung der Bauchmuskeln. Ob auch durch jeden Flügelschlag die am Schultergelenk und zwischen den Brustmuskeln liegenden Luftsackabschnitte abwechselnd erweitert und verengt werden und dadurch ein Luftwechsel bewirkt wird, ist zweifelhaft. Dadurch, daß außerordentlich viele und unverbrauchte Luft dem Vogel während des Fluges zugeleitet wird, ist es auch erklärlich, daß die in sehr großen Höhen fliegenden Vögel Arbeit leisten können, während die Säuger schon bei 3000 bis 4000 m infolge Verdünnung der Luft ermatten und der Bergkrankheit verfallen. Fliegt dagegen der Vogel nicht, so leidet er ebenfalls in großen Höhen unter der Luftverdünnung, was man an Tauben beobachtete, die man im Ballon in größere Höhen mit hinaufnahm.

γ) Säuger. Bei den Säugern kommt neben der Bewegung der Rippen für den Luftwechsel in den Lungen noch ein anderes Mittel hinzu, nämlich die Bewegung des Zwerchfells. Dieses ist eine muskulöse Querwand, die die Brusthöhle von der Leibeswand abtrennt. In der Mitte des Zwerchfells ist das sehnige Centrum tendineum gelegen, von dem nach allen Seiten Muskelbündel ausstrahlen, die sich an den hintersten Rippen und an die Wände des Brustbeins ansetzen. Die Einatmung geschieht allein durch Erweiterung der Brusthöhle, die zum Teil durch Bewegung der Rippen bewirkt wird, wie das auch bei den Sauropsidien der Fall ist. Einen großen Anteil hat aber auch das Zwerchfell, das im Zustande der Erschlaffung sich kuppelförmig in die Brusthöhle vorwölbt. Bei der Einatmung wird das Zwerchfell gespannt, die Wölbung also ausgeglichen und zwar durch Kontraktion der Muskeln. In Verbindung mit der inspiratorischen Vorwärtsdrehung der Rippen kommt dadurch eine bedeutende Erweiterung der Brusthöhle zustande, wobei die dehnbaren Lungen unter dem Druck der äußeren Luft dieser Erweitung folgen und die Luft dann in die Lungen einströmen kann. Die Ausatmung erfolgt durch Rückwärtsbewegung der Rippen und durch Erschlaffung der Zwerchfellmuskeln, das wieder seine gewölbte Lage einnimmt. Auch die Lungen selbst ziehen sich durch elastische Fasern in ihrer Wand zusammen. Eine heftige Ausatmung wird auch noch durch das Zusammenziehen der Bauchdecken unterstützt, die einen Druck auf das Zwerchfell ausüben und dieses gegen die Pleura vorwölben. Rippen- und Zwerchfelltätigkeit ist bei den einzelnen Säugern ungleich ausgeprägt. Wenn bei besonders starker Ausbildung der vorderen Ex-

tremitäten und damit auch des Schultergürtels (Elefanten, Pferde und große Wiederkäuer) die Bewegung der Rippen durch das Befestigen am Sternum gehemmt ist, so überwiegt die Zwerchfellatmung bedeutend. Wenn dagegen die vorderen Extremitäten nur wenig ausgebildet sind, also die Belastung des Brustkorbes eine geringere ist (Känguruhs, Halbaffen, Primaten usw.), so ist die Beweglichkeit der Rippen eine unbehinderte und die Zwerchfellatmung tritt gegenüber der Rippenatmung bedeutend zurück. Im

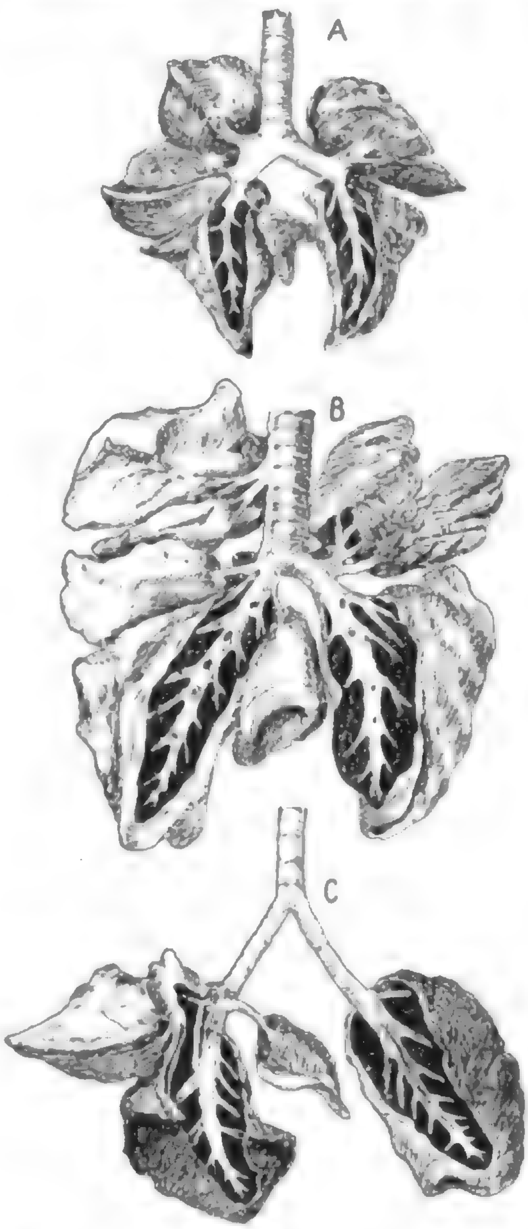


Fig. 55. Lunge mit teilweise freigelegten Bronchien (A) von einem Halbaffen (Lemur mongos L.), (B) vom Hausrind und (C) vom Schnabeltier (Ornithorhynchus). Nach Aeby.

Schlafe atmet der Mensch z. B. nur durch Rippenatmung. Bei der Frau ist die Rippenatmung stärker ausgeprägt als beim Manne, was wahrscheinlich als eine Anpassung an die Schwangerschaft aufzufassen ist, wo die Beweglichkeit des Zwerchfells durch die extreme Füllung der Bauchhöhle natürlich beeinträchtigt wird.

6. Beziehungen von Bau und Funktion bei den Atmungsorganen. Die verschiedene Art der Atmung hat sich auch im Bau der Lunge abgespiegelt, da wir ja der Funktion einen großen Anteil an der Formgestaltung zuschreiben müssen. Im allgemeinen ist bei der Lunge die Richtung der Hauptluftwege durch die Zugrichtung der Wände des Brustkorbes bedingt (Fig. 55, A bis C) und zwar stehen sie in der Richtung des Ansaugens. Bei Rippenatmung also mehr nach vorn und quer zur Längsachse, bei Zwerchfellatmung mehr nach hinten. Bei einer Vereinigung beider aber in Uebergangsrichtungen. Die Rippenatmung prägt sich auch darin aus, daß die vorderen Abschnitte der Lunge besonders stark entwickelt und die Seitenbronchien hier besonders groß sind. Bei vorwiegender Zwerchfellatmung ist das Umgekehrte der Fall, besonders ist dann der vordere Lungenabschnitt zurückgebildet.

Bei keinem Organsystem treten derartig enge Beziehungen zwischen Bau und Funktion klarer zutage wie bei den gesamten Respirationsorganen. Wohl nirgends ist die funktionelle Anpassung besser ausgeprägt als hier. Das erklärt uns auch den ungeheuren Formenreichtum dieser Organe und die wenig ausgeprägte genetische Einheit. Dennoch sind gerade die Respirationsorgane als Beweis für die verwandtschaftlichen Beziehungen mancher Tierklassen herangezogen worden (ich erinnere nur an die Ableitung der Lungenbücher von den Kiemen der Xiphosuren und die oft versuchte Homologie von Kiementaschen, Lungen und Schwimmblasen). Daß dieses nur in Verbindung mit anderen konstanteren Merkmalen geschehen kann, ist ohne weiteres aus der ungeheuren Variabilität der Respirationsorgane klar und Aehnlichkeiten sollten hier nicht als hauptsächlichstes Merkmal zu irgendwelchen phylogenetischen Ableitungen verwandt werden.

Auf dieser Fähigkeit der Organismen, Respirationsorgane unter den verschiedensten Bedingungen an den verschiedensten Teilen des Körpers ausbilden zu können, ruht ein gut Teil der Entwickelungsfähigkeit der Tiere zu höheren Zuständen überhaupt. Ist doch die Ausbildung von Respirationsorganen, die eine Luftatmung ermöglichen, eine direkte Vorbedingung für die Umwandlung von Wasser- zu Landtieren.

Literatur. ***Chr. Aeby***, *Der Bronchialbaum des Menschen und der Säugetiere. Leipzig 1880.* — ***Willy Alt***, *Ueber das Respirationssystem von Dytiscus marginalis L. Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd. 99, 1912.* — ***E. Babák und B. Dědek***, *Zur Frage über das Zustandekommen der Atem-*

bewegungen bei Fischen. Ctrbl. f. Physiol., Bd. **21**, *1907.* — **M. Baer,** *Beiträge zur Kenntnis der Anatomie und Physiologie der Atemwerkzeuge der Vögel. Ztschr. f. wiss. Zool., Bd.* **61**, *1896.* — **Berlese,** *Gli insetti. Milano 1909.* — **H. Bepler,** *Ueber die Atmung der Oniscoideen. Inaug.-Diss. Greifswald 1909.* — **H. Bernecker,** *Zur Histologie der Respirationsorgane bei Crustaceen. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* **27**, *1909.* — **L. Berteaux,** *Le poumon des Arachnides. La Cellule, T.* **5**, *Fasc. 2, 1889.* — **G. Börner,** *Beitrag zur Kenntnis der Pedipalpen. Zoologica, Heft 42, Bd.* **17**, *1904.* — **G. Bohn,** *Des localisations respiratoires chez les Annélides. Compt. rend. Soc. Biol., T.* **55**, *1903.* — **M. Bounhiol,** *Recherches biologiques expérimentales sur la respiration des Annélides Polychètes. Ann. d. Sciences nat. Zool., T.* **16**, *1902.* — **G. Brandes,** *Die Darmlunge der Regenwürmer. Verhandl. d. Ges. deutsch. Naturforscher u. Aerzte., 79. Vers., 1907, 2. T., 1. Hälfte.* — **K. Brandt,** *Ueber die morphologische und physiologische Bedeutung des Chlorophylls bei Tieren, 2. Art. Mitt. d. zool. Stat. z. Neapel, Bd.* **4**, *1883.* — **A. Brauer,** *Beiträge zur Kenntnis der Entwickelungsgeschichte des Skorpions. II. Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd.* **59**, *1895.* — **P. Clemens,** *Die äußeren Kiemen der Wirbeltiere. Anat. Hefte, 1. Abt., Heft 14, Bd.* **5**, *1894.* — **A. Combault,** *Contribution à l'étude de la respiration et de la circulation des Lombriciens. Journ. de l'Anat. et de la Physiol., T.* **45**, *1909.* — **L. Cuénot,** *Études morphologiques sur les Échinodermes. Arch. de Biol., T.* **11**, *1891.* — **Derselbe,** *La valeur respiratoire du liquide cavitaire chez quelques invertebrés. Trav. de Labor. Stat. zool. d'Arcachon 1900/01.* — **J. Deibel,** *Beiträge zur Kenntnis von Donatia und Macroplea unter besonderer Berücksichtigung der Atmung. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* **31**, *1911.* — **H. Eisig,** *Ueber das Vorkommen eines schwimmblasenähnlichen Organes bei Anneliden. Mitt. zool. Stat. z. Neapel, 1880.* — **G. Fischer,** *Vergleichend-anatomische Untersuchungen über den Bronchialbaum der Vögel. Zoologica, Bd.* **19**, *Heft 45, 1907.* — **E. Gaupp,** *Der Atemmechanismus beim Frosch. Arch. f. Anat. u. Phys., Abt. Anat., 1896.* — **C. Gegenbaur,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Leipzig 1898.* — **A. Goette,** *Ueber die Kiemen der Fische, Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd.* **69**, *1901.* — **Derselbe,** *Ueber den Ursprung der Lungen. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* **21**, *1905.* — **E. Haeckel,** *Report on the Siphonophorae collected by H. M. S. Challenger during the years 1873 bis 1876. Voyage of Challenger, Zool., Vol.* **38**, *1888.* — **V. Haecker,** *Der Gesang der Vögel, seine anatomischen und biologischen Grundlagen. Jena 1900.* — **B. Haller,** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. Jena 1904.* — **Derselbe,** *Ueber die Atmungsorgane der Arachnoiden. Arch. f. mikr. Anat., Bd.* **79**, *1911.* — **O. Hamann,** *Beiträge zur Histologie der Echinodermen, Heft 3, Jena 1887, auch in d. Jen. Ztschr. f. Naturw., Bd.* **21**, *1887.* — **G. Henninger,** *Die Labyrinthorgane bei Labyrinthfischen. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Bd.* **25**, *1908.* — **O. Hertwig,** *Handbuch der vergleichenden und experimentellen Entwickelungslehre der Wirbeltiere. Jena 1906.* — **Hesse-Doflein,** *Tierbau und Tierleben, Bd.* **1**. *Leipzig 1910.* — **E. Korschelt und K. Heider,** *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte der wirbellosen Tiere. Spez. Teil. Jena 1900.* — **A. Lang,** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie. Jena 1888 und 1900.* — **A. Lang und K. Hescheler,** *Mollusca. Langs Lehrb. d. vergl. Anat., 2. Aufl. Jena 1900 (dortselbst weitere Literatur über Mollusca).* — **H. Ludwig,** *Ueber die Funktion der Madreporenplatte und des Steinkanals der Echinodermen. Zool. Anz., Bd.* **13**, *1890.* — **E. W. Mac Bride,** *Echinodermata. The Cambridge natural History, Vol.* **1**, *London 1906, s. auch folgende Bände.* — **J. Mac Leod,** *Recherches sur la structure et la signification de l'appareil respiratoire des Arachnides. Arch. de Biol., T.* **5**, *1884.* — **Merkel-Bonnet,** *Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte.* — **L. C. Miall,** *Natural History of aquatic insects. London 1903.* — **A. Milani,** *Beiträge zur Kenntnis der Reptilienlunge. Zool. Jahrb., Morphol. Abt.,* **7**, *1894.* — **A. Oppel,** *Lehrbuch der vergleichenden mikroskopischen Anatomie der Wirbeltiere, 6. Teil, Atmungsapparat. Jena 1905.* — **A. S. Packard,** *A Text-Book of Entomology. New York 1898.* — **J. Sadones,** *L'appareil digestive et respiratoire larvaire des Odonates. La Cellule, T.* **11**, *1895.* — **K. C. Schneider,** *Lehrbuch der vergleichenden Histologie der Tiere. Jena 1902.* — **F. E. Schulze,** *Ueber die Luftsäcke der Vögel. Jena 1912.* — **K. Semper,** *Die Lunge von Birgus latro. Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd.* **30**, *1878.* — **J. W. Spengel,** *Ueber Schwimmblasen, Lungen und Kiementaschen der Wirbeltiere. Zool. Jahrb., Suppl.* **7**, *1904.* — **Ph. Stöhr,** *Lehrbuch der Histologie. Jena 1911.* — **J. H. Stoller,** *On the organs of respiration of the Oniscidae. Zoologica, Bd.* **10**, *Heft 25, 1899.* — **R. Wiedersheim,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Jena 1909.* — **H. Winterstein,** *Handbuch der vergleichenden Physiologie (die physikalisch-chemischen Erscheinungen der Atmung von H. Winterstein). Lief.* **22** *und* **25**. *Jena 1912.* **F. Zander,** *Studien über die Kiemenfilter bei Süßwasserfischen. Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd.* **75**, *1903.* — **Derselbe,** *Die Kiemenfilter der Teleostier, ibid., Bd.* **84**, *1906.* — **Derselbe,** *Die Kiemenfilter der Tiefseefische, ibid., Bd.* **85**, *1906.*

W. Harms.

Retzius

Anders, Adolf.

Geboren am 13. Oktober 1796 zu Lund, gestorben am 18. April 1860 zu Stockholm. Er war der Sohn des Naturforschers Anders Johann Retzius (1742 bis 1821). Seine Studien begann er zuerst in Lund und setzte sie später in Kopenhagen fort. 1820 wurde er Lehrer der Veterinäranstalt zu Stockholm, woselbst er ein anatomisches Museum begründete. 1824 bekam er eine Professur für Anatomie und Physiologie am Karolinischen Institut, 1839 auch an der Akademie der schönen Künste. In der ersten Periode seiner wissenschaftlichen Tätigkeit widmete er sich hauptsächlich anato-

mischen Studien. Eine Reihe von Abhandlungen über diesen Gegenstand erschienen in Johannes Müllers Archiv. Später wandte er sich mehr ethnographischen Studien zu. Vor allem hat er der Naturgeschichte des Menschen dadurch großen Vorschub geleistet, daß er die Methode der Schädelmessungen verbesserte, und daß er die Form des Schädels schärfer, als das bisher geschehen war, zu bestimmen suchte. Er legte den Grund für die heutigen exakten komplizierten Messungsmethoden. Auch teilte er zum ersten Male die Menschen nach der Form des Schädels in Dolichocephalen und Brachycephalen, eine Einteilung, die noch heute Gültigkeit hat und viel zum Ruhme seines Namens beitrug. Seine ethnographischen Schriften sind gesammelt in Svenska Läkaresällskapets Nya Handlingar (Stockholm 1864). Eine Prachtausgabe gab sein Sohn Magnus Gustav in deutscher Sprache unter dem Titel Ethnologische Schriften von Anders Retzius heraus (redigiert und teilweise übersetzt von Frisch, Stockholm und Leipzig, 1864).

Literatur. *Carus, Geschichte der Zoologie. München 1872.*

W. Harms.

Rhät.

Die oberste Zone des Keupers (vgl. den Artikel „Triasformation").

Rhizopoda.

A. Allgemeiner Teil.[1]

Die Rhizopoden im weiteren Sinne oder Sarkodinen können in ihrer Allgemeinheit nur negativ charakterisiert werden durch das Fehlen bestimmt ausgebildeter dauernder Bewegungs- und Ernährungsorganellen. So hoch organisiert und so außerordentlich verschieden bei den einzelnen Ordnungen der Bau des Körpers auch sein kann, so ist doch allen hierhergehörigen Formen eine nackte Oberfläche und mithin die Bewegung und Nahrungsaufnahme durch Pseudopodienbildung gemeinsam.

1. Pseudopodien. Die Art der Pseudopodien ist für die einzelnen Gruppen sowie für die einzelnen Arten meist außerordentlich charakteristisch, so daß sich hieraus wichtige Gesichtspunkte für das System ergeben. Man kann 3 bis 4 Typen von Pseudopodien unterscheiden:

Der erste Typus, die Lobopodien, sind mehr oder weniger breite lappen- oder fingerförmige Fortsätze mit abgerundetem distalem Ende. Im einfachsten Falle bildet die ganze Amöbe ein einziges breites Pseudopodium (Limaxform), meist werden jedoch mehrere nach verschiedenen Richtungen ausgesandt und wieder eingezogen (Fig. 1). Kleine Lobopodien bestehen nur aus Ektoplasma, größere weisen im Innern auch Endoplasma auf. Bei der Bildung der Pseudopodien kann oft deutlich die Umwandlung von Endo- in Ektoplasma und umgekehrt beobachtet werden. Am schönsten ist das bei der Bildung sogenannter Bruchsackpseudopodien der Fall, wobei die Haptogenmembran (Oberflächenhaut) an einer Stelle reißt und dann das darunterliegende Ektosamt Endoplasma hervorströmt und sich über das alte Ektoplasma ausbreitet, welches dann nachträglich in Endoplasma umgewandelt wird.

Der zweite Typus, die Filopodien, ist durch verschiedene Uebergänge mit den Lobopodien verbunden (Fig. 1C). Es sind das sehr feine zugespitzte Pseudopodien, die in der Regel nur aus Ektoplasma bestehen (Fig. 2). Häufig entspringen sie in Büscheln und verzweigen sich, bilden aber in der Regel keine Anastomosen untereinander, auch finden sich keine Körnchenströmungen in ihnen.

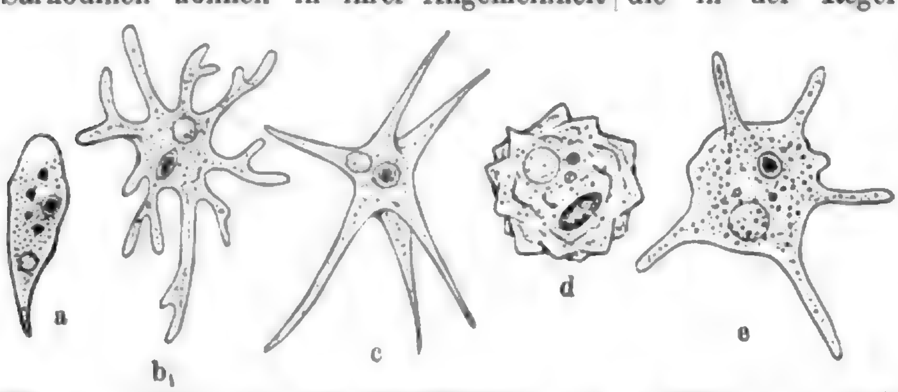


Fig. 1. Form- und Pseudopodientypen von Amöben. a Amoeba (Vahlkampfia) limax, b Amoeba proteus, c Amoeba radiosa, d Amoeba verrucosa, e Amoeba polypodia. Nach Doflein.

Der dritte Typus, die Rhizopodien, ist charakterisiert durch die außerordentliche Neigung, sich wurzelartig zu verästeln und durch Anastomosen sich gegenseitig zu verbinden. Auch dieser Typ ist durch Ueber-

[1] Vgl. hierzu auch den Artikel „Protozoa" in dem sich die Definitionen der hier benutzten Fachausdrücke finden.

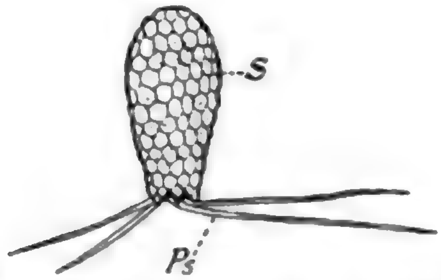


Fig. 2. **Euglypha alveolata** mit filosen Pseudopodien (Ps), Schale (S) aus Kieselplättchen. Nach Doflein.

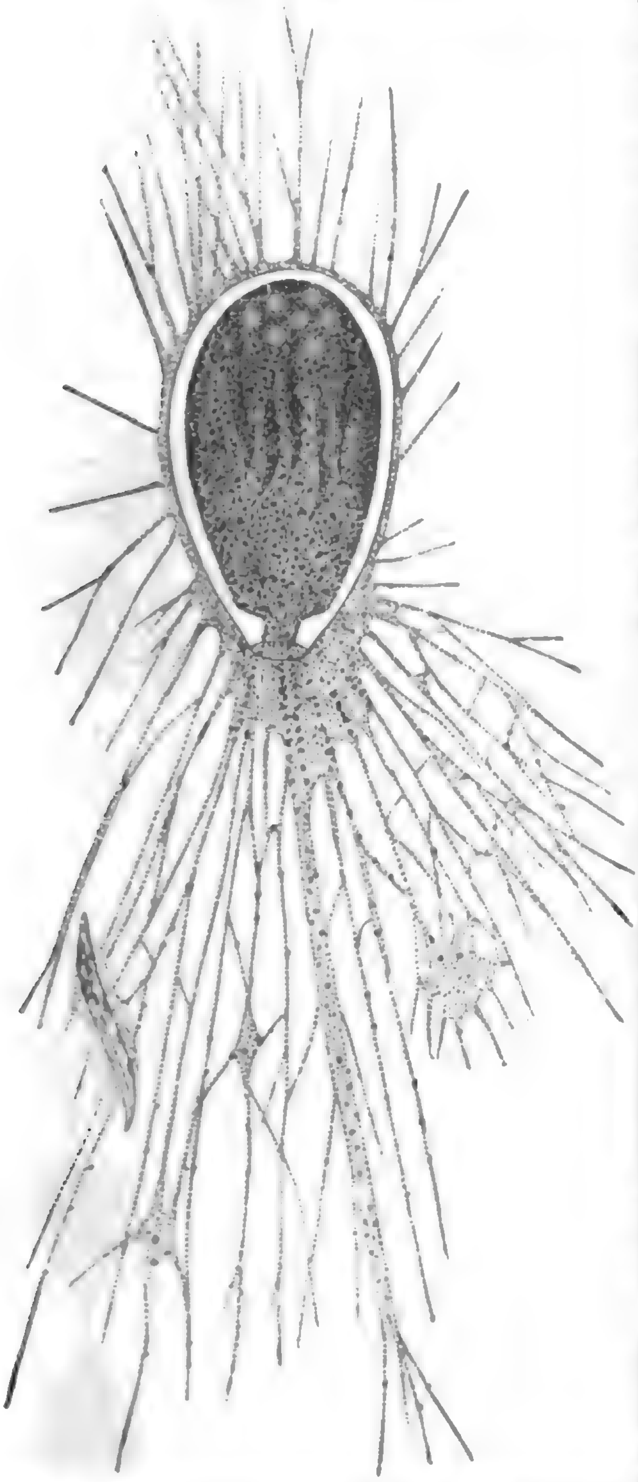


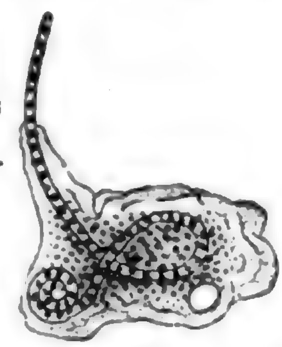
Fig. 3. **Allogromia oviformis** mit retikulosen Pseudopodien, Verdauung einer Diatomee außerhalb der Schale. Nach M. Schultze. Aus Lang.

gangsformen (z. B. Chlamydophrys), mit dem vorigen verbunden. Sie können außerordentlich komplizierte Netzwerke von feinen Fäden und Strängen bilden. Die Rhizopodien weisen stets ein körnchenreiches Plasma auf, an dem sich oft sehr deutlich die sogenannte Körnchenströmung beobachten läßt (Fig. 3). Während bei Lobopodien und Filipodien die Oberfläche aus zäherem Plasma besteht, ist hier die axiale Partie der Pseudopodien von festerer Konsistenz.

Die meist nur fein zugespitzten, selten sich verzweigenden Rhizopodien der Heliozoen besitzen vielfach eine feste axiale Differenzierung (Achsenfäden) und werden dann als Axopodien bezeichnet (näheres darüber s. S. 438).

Die Pseudopodien resp. die nackte Körperoberfläche dient auch der Nahrungsaufnahme, die bei Rhizopoden ziemlich allgemein rein holozoisch ist. Bei Amöben und Thecamöben wird die Nahrung in Nahrungsvakuolen in den Körper aufgenommen und dort verdaut. Die Aufnahme geschieht nach Rhumbler entweder durch Umfließung, indem der Nahrungskörper vom Plasma umflossen wird, oder durch Import, wobei beispielsweise lange Algenfäden einfach ins Innere der Zelle hineingezogen und aufgerollt werden (Fig. 4). Der erstere Modus findet sich bei

Fig. 4. Import eines Oscillarienfadens durch Amoeba verrucosa. Nach Rhumbler. Aus Lang.



allen mit Rhizopodien ausgestatteten Formen; dabei wird die Nahrung entweder durch Nachströmen von Pseudopodienplasma an Ort und Stelle verdaut (Fig. 4) oder sekundär in den Körper transportiert. Bei Amöben mit festerer Oberfläche (Pellicula) wird die Nahrung mit der Pellicula (Ektoplasma) ins Innere eingestülpt und erst später das Ektoplasma in Entoplasma umgewandelt.

Außerordentlich verbreitet sind bei den Rhizopoden Schalenbildungen mannigfacher Art, außerdem komplizierte innerplasmatische Skelette; sie sollen bei den einzelnen Ordnungen besprochen werden. Auch der Bau und die Inhaltsbestandteile des Protoplasmas sind bei den einzelnen Gruppen so mannigfaltig, daß es sich empfiehlt, sie erst dort zu besprechen.

2. Kerne und Kernteilung. Die Organisation und Vermehrung der Kerne ist bei den Rhizopoden außerordentlich verschieden ausgebildet, doch läßt sich in den 3 Unterklassen die Entwickelung phylogenetisch und ontogenetisch von einfacheren Caryosomkernen bis zu komplizierten polyenergiden Kernen verfolgen. Die einfachsten Caryosomkerne finden wir bei den nackten Amöben; bei den kleineren Arten ist ein großes Caryosom und wenig Außenchromatin vorhanden und lokomotorische und generative Komponente werden bei der Mitose oder Promitose vom Caryosom geliefert (s. den Artikel „Protozoa“ Fig. 6I). Es bildet eine Zentralspindel entweder mit breiten chromatischen Polkappen oder nur mit Centriolen. Hand in Hand mit der Größenzunahme der Tiere geht die Tendenz, das Caryosom zyklisch abzubauen, was eine starke Ausbildung des Außenkernes zur Folge hat, der entweder rein trophisch (Amoeba vespertilio nach Doflein) ist oder auch generatives Material enthält. Dieser Prozeß kann sowohl ontogenetisch bei derselben Art wie auch durch den Vergleich verschiedener Arten festgestellt werden. So haben die jungen Individuen von Entamoeba blattae einen einfachen Caryosomkern, bei mittleren ist schon ein starker Außenkern entwickelt mit kleinem Caryosom und bei erwachsenen wird letzteres groß und schwammig und löst sich schließlich in ein achromatisches Kerngerüst auf,

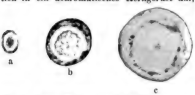

a b c

Fig. 5. Kernveränderungen beim Heranwachsen von Entamoeba blattae. Nach Hartmann.

in dem nur äußerst selten noch das Cytozentrum erkennbar bleibt (Fig. 5; vgl. auch den Artikel „Protozoa“ Fig. 6III). Eine besondere Ausbildung typischer Caryosomkerne findet sich bei manchen Thecamöben und primitiven Radiolarien, indem hier ähnlich wie bei den Euglenen unter den Flagellaten die generative Komponente ausschließlich vom Außenkern geliefert wird, während das Caryosom eine typische Zentralspindel bildet (Beispiele: Chlamydophrys stercorea [Fig. 6] und — vegetative Kernteilungen von Sphaerozoen — Collozoum [Fig. 7, a u. b]). Bei nächst verwandten Arten, ja sogar bei derselben Art in anderen Entwickelungsstadien (Teilungen der weiblichen Geschlechtskerne von Collozoum; Fig. 7, c u. d), kann jedoch das Caryosom als Teilungsorganell stark reduziert sein, oder

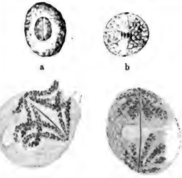

a b c d

Fig. 7. Collozoum inerme. a u. b vegetative Kernteilung, c u. d extrakapsuläre Körper mit Teilung der weiblichen Geschlechtskerne. Nach Hartmann und Hammer.

es kann auch der Binnenkörper bei der Kernteilung vollkommen aufgelöst werden und eine rein achromatische Spindel ohne sichtbare Zentren vorkommen (Chlamydophrys schaudinni, Fig. 8). Trotzdem muß auch in letzterem Falle das Vorhandensein bestimmter Zentren angenommen werden, denn die

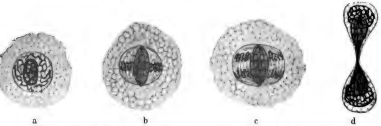

a b c d

Fig. 6. Kernteilung von Clamydophrys stercorea. Nach Schaudinn.

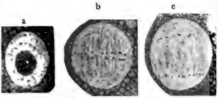


Fig. 8. Kernteilung von Clamydophrys schaudinni. Nach Schüßler.

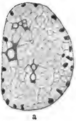




Fig. 9. Kernteilung von Actinosphaerium eichhorni. Nach R. Hertwig. Aus Gurwitsch.

Kerne plasmogamierter (s. unten) Tiere, die aus zwei bis mehreren Kernen verschmolzen sind, zeigen bei der Teilung genau so viele Spindelpole als ursprüngliche Kerne. In ähn-

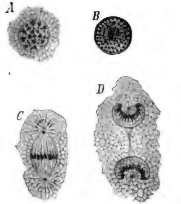


Fig. 10. Kern und Kernteilung von Centropyxis aculeata. Nach Schaudinn. Aus Doflein.

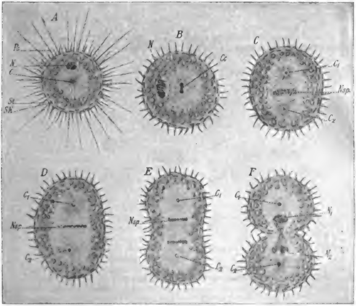


Fig. 11. Teilung von Acanthocystis aculeata Hertwig und Lesser. N Kern, C Zentralkorn, Cc dessen Teilung, C_1C_2 geteilte Zentralkörner, N_1N_2 Tochterkerne, Ps Pseudopodien, St Stacheln, Sk Skelettplättchen der Hülle. Nach Schaudinn. Aus Doflein.

licher Weise sind wohl auch die Kernteilungen von Trichosphaerium und die der vegetativen Individuen von Actinosphaerium (Fig. 9) zu verstehen, wobei der Binnenkörper noch im Ruhezustand des Kernes aufgelöst wird und ein einheitliches Reticulum entsteht, aus dem sich eine achromatische Spindel, im letzteren Falle mit Polkappen (Zentren), bildet. Bei Centropyxis findet sich dagegen im Ruhekern ein Gerüst mit gleichmäßiger Chromatinverteilung, während vor der Teilung ein deutliches zentrales Zentriol (= Caryosom) auftritt (Fig. 10). Alle bisher besprochenen Kerntypen sind Zentronuclei mit internukleären Teilungszentren.

Ganz eigenartige Verhältnisse zeigt eine große Anzahl von Heliozoen (Acanthocystiden). Hier findet sich neben dem eigentlichen Kern, der einen abgeleiteten Caryosomkern mit schwammig vergrößertem Caryosom darstellt, ein zentral gelegenes kernartiges Gebilde (Zentralkorn), von dem während der vegetativen Periode die Achsenfäden ausgehen und das seine Kernnatur durch reichen Chromatingehalt und scharf ausgeprägte zyklische Veränderungen dokumentiert. Bei der Kernteilung bildet das Zentralkorn entweder eine Zentralspindel, wozu der Hauptkern die generative Komponente liefert (Acanthocystis, Fig. 11) oder der Hauptkern teilt sich selbständig promitotisch und die getrennten Zentralkörper treten ohne nähere direkte Beziehung an die Kernpole (Wagnerella, Fig. 12). Daß auch im ersteren Falle

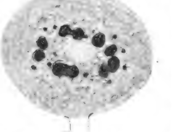


Fig. 12. Kopf von Wagnerella borealis mit mehrfacher Zweiteilung von Kern- und Zentralkorn. Nach M. Zülzer.

der Hauptkern noch eine selbständige lokomotorische Komponente besitzt, ergibt sich daraus, daß er bei der Knospung der Tiere sich selbständig teilt, während das Zentralkorn zugrunde geht (Fig. 13). Die hierbei gebildeten einkernigen Knospen bilden durch intranukleäre heteropole Caryosomteilungen ein neues Zentralkorn, das nachträglich aus dem Hauptkern herausrückt (s. den Artikel „Protozoa" Fig. 9, a—c). Das Zentralkorn wird von manchen Autoren nicht als 2. rückgebildeter Kern (ohne generative Komponente), sondern einfach als die aus

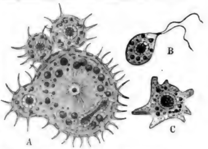
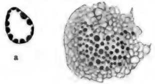


Fig. 13. Knospung von Acanthocystis aculeata. Kernteilung ohne Zentralkorn. B aus einer Knospe entstandener Schwärmer, C dessen Umwandlung in eine amöboide Form. Nach Schaudinn. Aus Doflein.

dem Kern ausgetretene lokomotorische Komponente angesprochen. Da aber der Hauptkern seine besondere lokomotorische Komponente bei der Knospung zeigt, erscheint die erste Auffassung wahrscheinlicher. Auch bei der Gattung Paramoeba findet sich ein zweiter merkwürdig differenzierter Kern, dessen Natur und Bedeutung jedoch noch nicht ganz geklärt ist.

Bei den höheren Rhizopoden (Foraminiferen), dem Heliozoon Wagnerella und vielen Radiolarien kommt es schließlich zu hochkomplizierten polyenergiden Kernen. Am klarsten liegt ihre Genese bei Wagnerella, hier teilt sich das mit einem deutlichen Zentriol ausgestattete Caryosom fortgesetzt durch Zweiteilung innerhalb der Kernmembran; die Sekundärcaryosome können infolge ungleichen Wachstums verschiedene Größe aufweisen. Dieses ganze Polycaryon zerfällt entweder simultan in seine Einzelelemente, oder es treten nur einzelne Sekundärkerne durch Knospung aus ihm heraus, was den Eindruck von Chromidienbildung erweckt (s. den Artikel „Protozoa" Fig. 10). Aehnlich liegen offenbar die Kernverhältnisse bei den meisten Foraminiferen (Fig. 14), doch ist hier nur der multiple Zerfall der Kerne, nicht ihre Genese genauer bekannt. Bei koloniebildenden Radiolarien (Collozoum), deren Kernteilung oben geschildert wurde, finden sich in jungen Kolonien öfters mehrpolige Mitosen, wodurch, wenn auch in geringem Grade, polyenergide Kerne zustande kommen, die jedoch bald wieder in ihre Einzelelemente zerlegt werden. Die großen einkernigen Radiolarien besitzen riesige Poly-

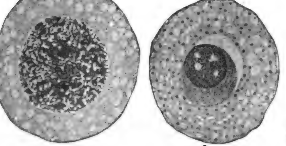
carien, deren Genese zwar nicht bekannt ist, deren Schicksal bei der Gametenbildung jedoch deutlich die polyenergide Natur erweist. Bei Aulacantha differenzieren sich aus dem



a b

Fig. 14. Polyenergider Kern (a) und dessen multiple Teilung (b) von Calcituba polymorpha. Nach Schaudinn. Aus Doflein.

Chromatingerüst die Chromosomen (Sekundärkerne) und treten nach Auflösung der Kernmembran zum großen Teil ins Entoplasma über, wo sie sich durch Mitose nach Art der von Collozoum weiter vermehren, während ein großer Rest als somatischer Kernteil zugrunde geht (Fig. 15). Der große Kern



a b

Fig. 15. Aulacantha scolymantha. Zwei Stadien der Auswanderung der Sekundärkerne aus dem Polycaryon. Nach Borgert.

von Aulacantha kann sich bei der vegetativen Zweiteilung auch durch eine Art Mitose teilen, die durch die große Zahl von Chromosomen (über 1000) auffällt (Fig. 16). Diese Absonderlichkeit erklärt sich daraus, daß die sogenannten Chromosomen vollwertige Sekundärkerne sind und die sogenannte Mitose eben die gleichzeitige parallele Teilung der bereits vorgebildeten Sekundärkerne darstellt. Sehr eigenartig ist die Aufteilung des Polycaryons bei Tallasicolla (Microgametenbildung). Hier ordnen sich die Sekundärkerne innerhalb der Kernmembran des Primärkerns zu mehreren in Schläuchen an, wobei sie sich schon mitotisch teilen. Später wandern sämtliche Schläuche mit einem Schlage durch die Kernmembran

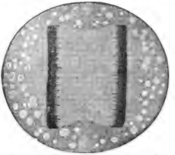


Fig. 16. Zweiteilung der Zentralkapsel von Aulacantha scolymantha mit Spätstadium der Mitose des Polycaryons. Nach Borgert.

ins Plasma über (vgl. den Artikel „Protozoa" Fig. 11).

Als dritter Kernvermehrungsmodus wird für viele Rhizopoden eine Kernbildung aus Chromidien angegeben, die früher oder später aus dem Kern ins Plasma übergetreten seien. Bei den Thecamöben sind die Chromidien ziemlich allgemein verbreitet (Fig. 17), scheinen aber nach neuen Untersuchungen kein generatives Kernmaterial darzustellen, sondern sind wahrscheinlich Reservestoffe, die die darin liegenden Kerne zeitweilig verdecken. In den Fällen (Foraminiferen und Radiolarien), in denen eine derartige Kernbildung wirklich erwiesen scheint, ist sie wohl eher als die Aufteilung eines polyenergiden Kernes zu betrachten nach Art

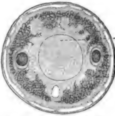


Fig. 17. Arcella vulgaris von unten. Ch Chromidien, N Kern, O Schalenöffnung. Nach R. Hertwig.

von Wagnerella und Thallassicolla.

Die Zahl der Kerne ist selbst innerhalb der einzelnen Gruppen sehr verschieden. Einkernig sind die meisten Amöben und Thecamöben, viele Heliozoen und Radiolarien, durchgehend mehrkernig (viele Einzelkerne oder ein Polycaryon) sind die Foraminiferen und die meisten Radiolarien.

3. Fortpflanzung, Befruchtung und Entwickelung. Entsprechend der großen Verschiedenheit der Kerne und ihrer Vermehrung sowie der daraus resultierenden Verschiedenwertigkeit der Formen sind auch die Fortpflanzungsvorgänge der Rhizopoden sehr mannigfaltig. Die meisten Amöben, Thecamöben, Heliozoen und ein Teil der Radiolarien vermehren sich durch einfache Zweiteilung, die entweder mit der Kernteilung Hand in Hand geht (siehe Fig. 12) oder auch erst später einsetzen kann. Eine besondere Art der Zweiteilung ist die durch die einpolige feste Schale bedingte sogenannte Knospungsteilung der Thecamöben (Fig. 18). Bei Heliozoen (Acanthocystis) findet sich neben Zweiteilung oft eine mehrfache Knospung, wobei von einem größeren Muttertier kleinere

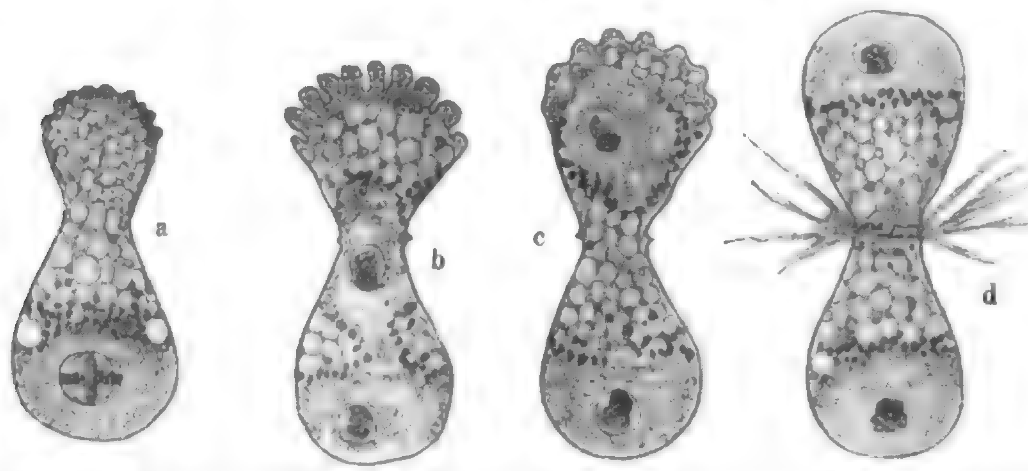


Fig. 18. Knospungsteilung von Clamydophrys stercorea. Nach Schaudinn.

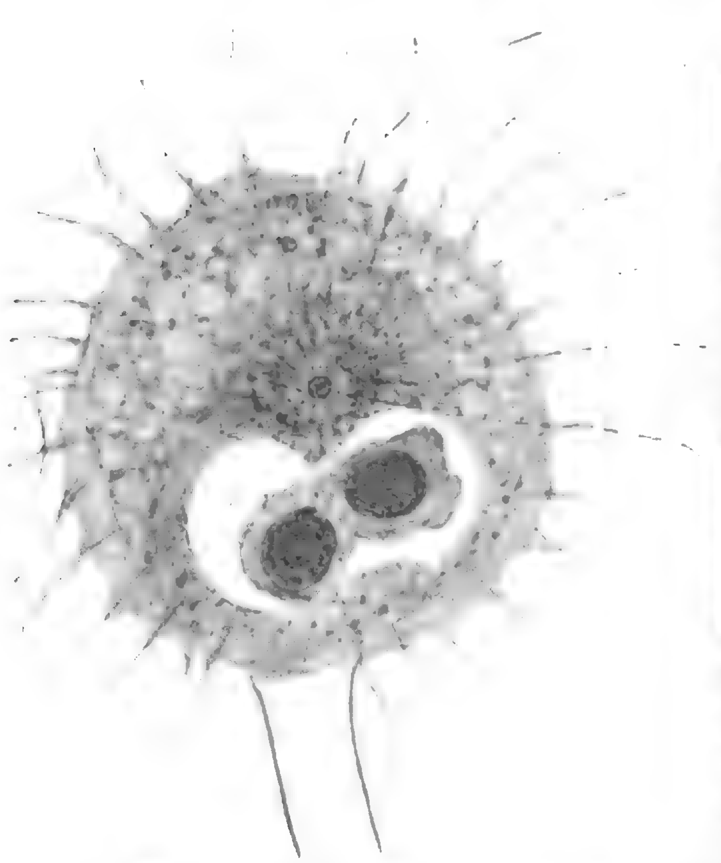


Fig. 19. Kopf von Wagnerella borealis mit 2 endogenen Knospen. Kerne mit Centriol (Caryosom). Nach Zülzer.

Tiere fortgesetzt abgeschnürt werden, die Geißeln ausbilden (s. Fig. 13). Bei Wagnerella geht die Knospung endogen innerhalb des Muttertieres vor sich (Fig. 19). Schon bei Amöben und Thecamöben kann es neben der Zweiteilung nach mehrfacher Kernteilung zu multiplen Zerfallsteilungen kommen. Die daraus hervorgehenden Sprößlinge sind entweder Agameten oder Gameten. Für die stets polyenergiden Foraminiferen ist dies die ausschließliche Vermehrungsweise, unter Heliozoen ist sie nur bei Wagnerella beobachtet. Auch für die Radiolarien ist die multiple Vermehrung die Regel. Bei den Sphaerozoen findet sie sich in Form von Isosporenbildung (Agameten) und Anisosporenbildung (Gameten), die beide mit Geißeln ausgestattet sind (Fig. 20). Eine merkwürdige Modifikation der Gametenbildung sehen wir bei jungen Kolonien in dem Auftreten von sogenannten extrakapsulären Körpern; es sind das die Anlagen der Makrogameten, die aus der Zentralkapsel herausquellen und außerhalb in Makrogameten zerfallen (Fig. 8, c u. d), während der zurückbleibende Rest die Mikrogameten liefert. Auch bei Thallasicolla gibt es zweierlei Arten multipler Vermehrung, die sich vor allem durch ihre Kernverhältnisse unterscheiden, vermutlich handelt es sich ebenso wie bei Aulacantha um Makro- und Mikrogametenbildung bei

verschiedenen Individuen, doch sind die Verhältnisse noch nicht vollkommen geklärt.

Eine besondere Beurteilung kommt der Zweiteilung und Knospung polyenergider Formen zu, die als Plasmotomie bezeichnet wird, da hier einfach mehrkernige Plasma-

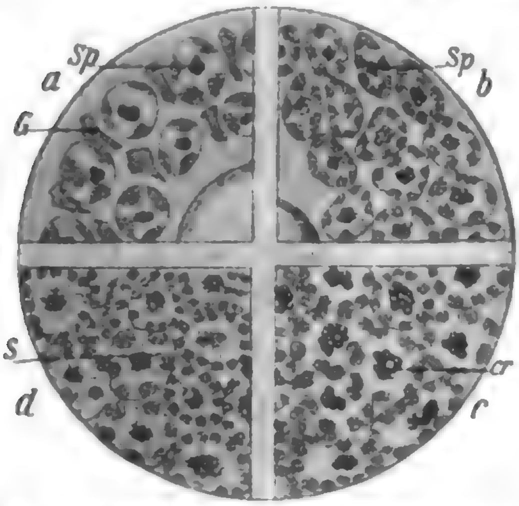


Fig. 20. Schema der Gametenbildung von Collozoum inerme in 4 Stadien (a bis d), herausgeschnittene Quadranten von Zentralkapseln. Die wenigkernigen Kerngruppen (Sp) liefern Makrogameten, die vielkernigen Mikrogameten; cr Fettträubchen. Nach Brandt. Aus Doflein.

stücke ohne Beziehung zu den Kernen gebildet werden. Sie ist bei Trichosphaerium sowohl in Form von Zweiteilung wie mehrfacher Durchschnürung bekannt und findet sich ferner bei den koloniebildenden Radiolarien, wo sich die vielkernigen Einzelindividuen innerhalb der Kolonie durch Zweiteilung vermehren. Auch die Zweiteilung von Aulacantha mit ihrer merkwürdigen Mitose kann trotz der vorliegenden Beziehung zwischen Kern- und Zellteilung in gewissem Sinne der Plasmotomie zugerechnet werden, da die Teilung eines Polycaryons vorliegt.

Befruchtung und Entwickelung. Selbstverständlich zeigen auch die Befruchtungsvorgänge die größte Mannigfaltigkeit. Die primitivste Befruchtung ist eine isogame Hologamie, die sich unter Amöben bei Amoeba diploidea,

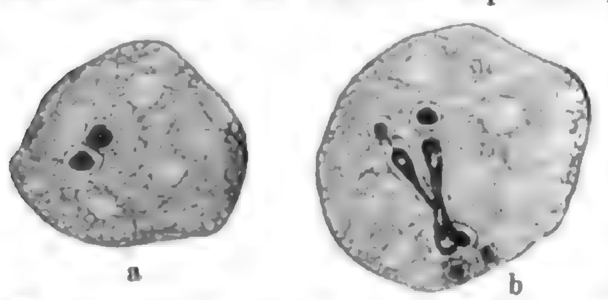


Fig. 21. Teilung von Amoeba diploidea. Nach Hartmann und Nägler. Aus Doflein.

unter Heliozoen bei Actinophrys sol findet. Erstere ist durch zwei Kerne ausgezeichnet, die sich bei der vegetativen Teilung gleichzeitig parallel teilen und als die unverschmolzen gebliebenen Gametenkerne von der vorausgegangenen Befruchtung zu deuten sind (Fig. 21). Bei der Kopulation encystieren sich zwei zweikernige Individuen (Fig. 22) und nun verschmelzen in jedem

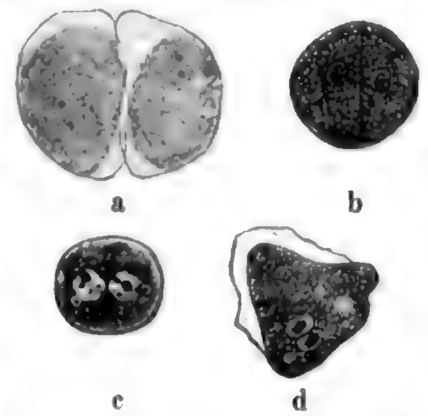


Fig. 22. Hologamie von Amoeba diploidea. a Vereinigung von zwei doppelkernigen Kopulanten, b Caryogamie in beiden Kopulanten, c Reduktionsteilungen, d Ausschlüpfen einer Amöbe aus der Kopulationscyste. Nach Hartmann und Nägler. Aus Doflein.

Kopulanten die beiden Kerne, so daß die Caryogamie des vorausgegangenen Geschlechtsaktes erst jetzt zu Beginn eines neuen stattfindet. Hierauf folgen an jedem der verschmolzenen Kerne zwei Reduktionsteilungen unter Verschmelzen der Plasmakörper. Die nun reduzierten Gametenkerne rücken aufeinander zu und nach Platzen der Cyste schlüpft eine zweikernige vegetative Amöbe aus. Der Vorgang bei Actinophrys unterscheidet sich von dem ebengeschilderten nur dadurch, daß die Caryogamie noch innerhalb der Kopulationscyste stattfindet. Etwas kompliziertere, aber immerhin hier anzureihende Verhältnisse sehen wir bei der vielkernigen Heliozoe Actinosphaerium (Fig. 23). Nach Encystierung in einer Gallertcyste zerfällt nach Verminderung der Kernzahl das Protoplasma in so viel Tochtercysten, als noch Kerne vorhanden sind. Jede Tochtercyste teilt sich dann nach Kernteilung in zwei Zellen, die Gameten, die nach Reduktionsteilungen wieder miteinander verschmelzen. Die Gameten sind in diesem Falle Geschwisterzellen, es handelt sich mithin um eine Paedogamie.

Auch extreme Autogamie, die durch Unterdrückung der Zellteilung bei der Gametenbildung von der Paedogamie abgeleitet werden kann, ist bei Rhizopoden und zwar bei Amoeba (Vahlkampfia) albida beobachtet worden. Der Vorgang spielt sich in der Cyste ab, der in Einzahl vorhandene Caryo-

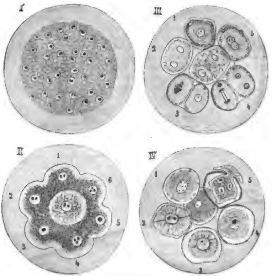


Fig. 23. Pädogamie von Actinosphaerium eichhorni. I Muttercyste, II Bildung der Primärcysten, III Bildung der Sekundärcysten (Gameten) (1 bis 3), Reduktionsteilung der Gameten (3 und 4), Kopulation (5), IV Caryogamie (2) und Ausschlüpfen einer jungen 3-kernigen Form (5) aus der Zygote. Nach R. Hertwig.

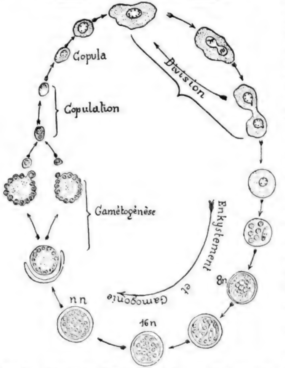


Fig. 24. Schema des Entwickelungszyklus von Entamoeba blattae. Nach Mercier.

somkern teilt sich in einen größeren und kleineren Kern. Ersterer rückt an die Oberfläche und löst sich allmählich auf, er ist ein somatischer Kern entsprechend dem Makronukleus der Infusorien. Der andere nimmt eine merkwürdige Tetradenform an und teilt sich unter Abschnürung zweier kleiner Reduktionskerne in die zwei Gametenkerne, die nach Resorption der Reduktionskerne zu einem Syncaryon verschmelzen.

Bei Actinosphaerium lag, streng genommen, eine Merogamie vor. Dieselbe findet sich schon ganz ausgesprochen bei nackten Amöben, wo sie neuerdings bei Entamoeba blattae (Fig. 24) und Amoeba minuta nachgewiesen ist. Die einkernige Amöbe encystiert sich unter Vermehrung des Kernes. Nach einer Neuinfektion platzen die Cysten und es schlüpfen der Kernzahl entsprechend viele kleine Amöben aus, die als Gameten paarweise kopulieren und zu vege-

tativen Formen heranwachsen. Eine derartige Merogamie scheint bei allen höheren Rhizopoden verbreitet zu sein. Eines der schönsten Beispiele liefert nach Schaudinns Untersuchungen das vielkernige Rhizopod Trichospaerium (Fig. 25), das in geißeltragende Isogameten zerfällt. Die Zygote wächst jedoch zu einer von dem Gamonten (5) morphologisch verschiedenen Form (1) heran, die sich ebenfalls durch Zerfallsteilung vermehrt, aber Agameten liefert (Fig. 25, 1—3). Hierdurch kommt ein ausgesprochener Generationswechsel mit Dimorphismus zustande. Auch für einkernige Thecamöben hat Schaudinn eine derartige Gametenbildung angegeben. Vollkommen sichergestellt ist sie ferner von Schaudinn und Lister für die Foraminifere Polystomella und von Winter für Peneroplis; hier ist noch ausgesprochener als bei Trichosphaerium der Generationswechsel mit einem Dimorphismus verbunden, der sich auf den Schalenbau und Kernverhältnisse ertreckt (Fig. 26). Bei der Gametenbildung werden monoenergide zweigeißelige Isogameten gebildet, während ein durch Zusammenfließen aus mehreren Kernen entstandener Makronukleus als Somakern zugrunde geht (Fig. 30, B, C). Nach der Kopulation (D) entstehen mikrosphärische Individuen mit kleiner Anfangskammer, die viele polyenergide Kerne

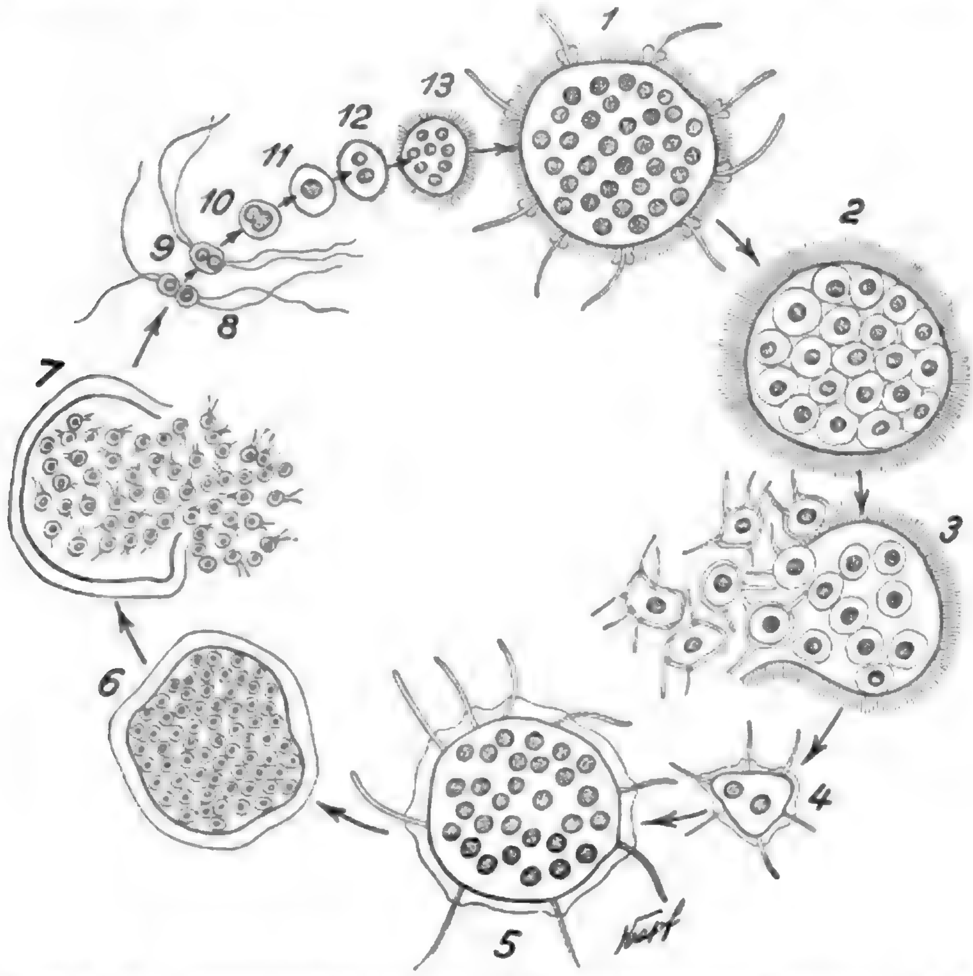


Fig. 25. Schema des Entwickelungszyklus von Trichosphaerium sieboldi. 1 bis 3 agame multiple Vermehrung, 5 bis 7 Gametogonie, 8 bis 10 Kopulation. Nach Schaudinn. Aus Selenka-Goldschmidt.

enthalten und schließlich in amöboide polyenergide Agameten zerfallen (Fig. 26, E, D). Letztere werden zu makrosphärischen Individuen (A, B), da sie infolge ihrer erheblicheren Größe gegenüber der Zygote gleich eine größere Anfangskammer bilden. Sie weisen entweder die gleichen Kernverhältnisse wie die mikrosphärischen Individuen auf und zerfallen dann wieder in Agameten, oder aber sie werden nach Zerfall der polyenergiden Kerne in die Einzelelemente (was als Chromidienbildung gedeutet wurde) und Bildung des Makronukleus zu Gamonten. Makrosphärische Individuen und Gamonten sind daher nicht, wie meist angenommen wird, immer gleichbedeutend, vielmehr besteht der Unterschied zwischen Gamont und Agamont nur in den Kernverhältnissen, während der Dimorphismus der Schale nur eine Folge der verschiedenen Größe der Fortpflanzungskörper ist. Auch bei den Radiolarien ist dieser Modus der Befruchtung ganz allgemein ausgebildet, nur ist

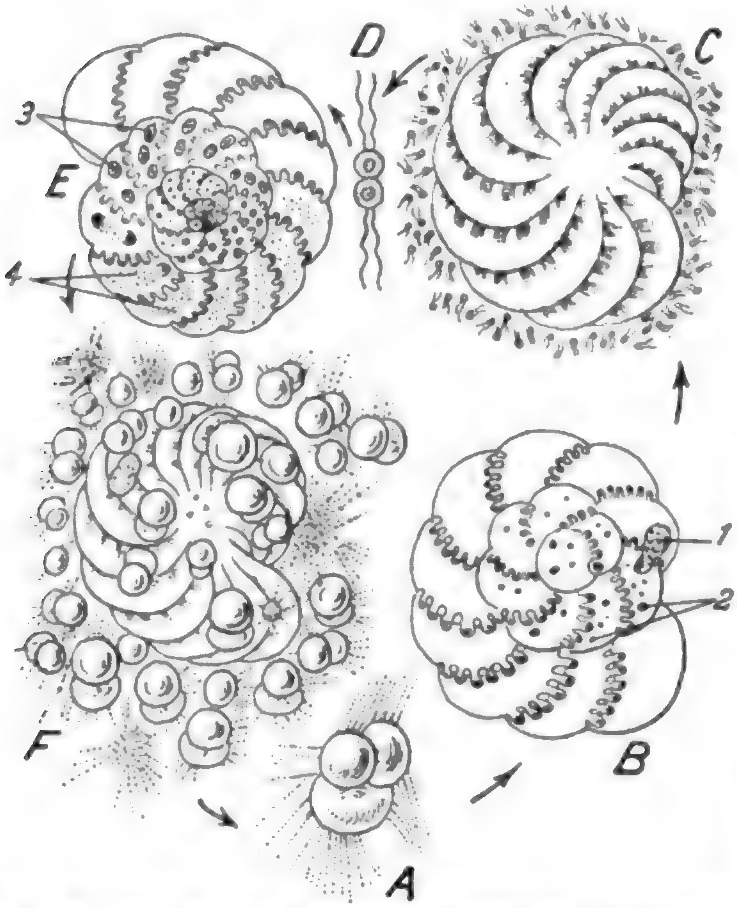


Fig. 26. Schema des Entwickelungszyklus von Polystomella. A bis C Makrosphärische Generation mit Gametenbildung (C), 1 Makronukleus, 2 Sekundärkerne, E und F mikrosphärische Generation mit Agametenbildung (F). Nach Schaudinn.

die Entwickelung noch insofern weiter geschritten, als die Gameten, wenigstens bei den Sphaerozoen, bei denen allein ihre Kopulation beobachtet wurde, deutlich verschieden (Anisogameten) sind (Fig. 27). Beiderlei Gameten werden entweder in einem Individuum gebildet (Collozoum, s. Fig. 20)

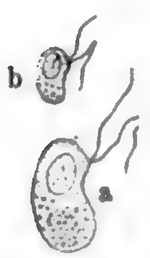


Fig. 27. Makro (a)- und Mikro (b)-Gameten von Collozoum inerme. Nach Brandt aus R. Hertwig.

oder in verschiedenen (Collosphaera); letzteres scheint auch bei Thallasicolla und Aulacantha der Fall zu sein.

Besonders bei Thecamöben sind unter dem Namen Plasmogamie bekannte Vorgänge verbreitet (wobei 2 bis viele Individuen verschmelzen), die früher vielfach als Wurzel der Befruchtungsvorgänge angesehen wurden, jedoch nichts damit zu tun haben. Sie treten nur bei ungünstigen Lebensbedingungen auf.

B. Systematischer Teil.

In systematischer Hinsicht ergeben sich infolge unserer mangelhaften Kenntnis der Biologie und Entwickelung, hauptsächlich der einfacheren beschalten Formen, einige Schwierigkeiten, so daß für diesen Teil ein festes, auf natürliche Verwandtschaftsbeziehungen gestütztes System heute noch nicht gegeben werden kann. Häufig teilt man die Sarkodinen in 5 Ordnungen: 1. die Amoebina, 2. die Foraminifera, 3. die Heliozoa, 4. die Radiolaria, 5. die Mycetozoa. Während sich die drei letzten Gruppen gut charakterisieren lassen, ist es nicht möglich, die beiden ersten sicher gegeneinander abzugrenzen. Denn der Charakter der Schale, wodurch hierbei die Foraminiferen von den nackten Amöben abgetrennt werden, ist systematisch nicht von der Bedeutung, und es werden bei einer derartigen Scheidung Organismen, wie viele Thecamöben, die in ihrer ganzen Cytologie und in ihrer Entwickelung unzweifelhaft in die allernächste Nähe der Amöben gehören, mit viel komplizierteren Formen vereinigt. Auch der Charakter der Pseudopodien (ob lobos, filos oder retikulos), auf den oft die Ordnungen begründet werden, kann nicht ausschlaggebend für die Gruppenbildung sein, da auch hier bei nahe verwandten Formen die einzelnen Pseudopodiengruppen nebeneinander vorkommen, wenn auch die höheren Rhizopoden durchweg retikuläre Pseudopodien aufweisen. Daß der Besitz von Rhizopodien nicht als Einteilungsprinzip gelten kann, zeigt ein Hinweis auf die so einheitliche Flagellatengruppe der Chrysomonaden, bei der nahe verwandte Formen lobose, filose sowie reticulose Pseudopodien bilden.

Es empfiehlt sich daher, die einfachen beschalten Formen von den Foraminiferen abzutrennen und sie wegen der Uebergänge, die sie sowohl mit den Amöbinen wie auch mit den Foraminiferen verbinden, zusammen mit diesen beiden Ordnungen zur Unterklasse der Rhizopoden im engeren Sinne zu vereinigen. Wir kommen dann zur folgenden Einteilung der Sarcodinen, wobei jedoch ausdrücklich betont sei, daß den beiden ersten Ordnungen nur ein provisorischer Charakter zukommen kann.

1. Unterklasse: Rhizopoda.

1. Ordnung: Amoebina.

2. Ordnung: Testacea.
3. Ordnung: Foraminifera.
2. Unterklasse: Heliozoa.
3. Unterklasse: Radiolaria.
4. Unterklasse: Mycetozoa (Myxomyceta).

Die Mycetozoen werden in diesem Handbuch besonders dargestellt (siehe den Artikel „Pilze").

1. Klasse: **Rhizopoda** (im engeren Sinne).

Die Rhizopoden umfassen Sarcodinen mit lobosen, filosen und retikulosen Pseudopoden, jedoch nie mit Axopodien. Die hierher gehörigen Formen sind entweder nackt oder besitzen monaxone, oft komplizierte Schalen, die teils häutig, meist kalkig, selten kieselig oder aus verkitteten Fremdkörpern bestehen. Kerne, Fortpflanzung und Befruchtung in den 3 Ordnungen zum Teil sehr verschieden.

1. Ordnung. **Amoebina** Ehrenberg.

Stark formveränderliche nackte Protozoen, die sich während ihres ganzen Lebens vermittels Pseudopodien bewegen. Schalen und Skelettbildungen fehlen stets. Bei vielen Formen ist eine dauernde Sonderung in Ento- und Ektoplasma vorhanden. Das an und für sich schon zähflüssige Ektoplasma kann bei manchen Arten (Erdamöben) in eine festere Pellicula übergehen; zuweilen (Amoeba proteus) kann anscheinend noch außerhalb des Ektoplasmas eine schleimige Hüllschicht vorkommen. Die Form der Pseudopodien kann sehr verschieden sein. Sie hängt sowohl von inneren Faktoren (Konsistenz des Plasmas, Verhältnis zwischen Ekto- und Entoplasma) ab, als auch von der Art des umgebenden Mediums. Kontraktile Vakuolen fehlen den marinen und parasitischen Formen.

Die Kerne sind echte oder nur wenig abgeleitete Caryosomkerne mit oft sehr deutlichen zyklischen Veränderungen. Die Kernteilung kann (zuweilen sogar bei derselben Form) als Mitose oder Promitose verlaufen.

Die Vermehrung geschieht durch Zweiteilung, wie auch durch multiple Teilung. Befruchtungsvorgänge sind in Form von Hologamie, Merogamie und Autogamie bekannt (s. oben S. 429 u. 430).

Bei der Gattung Paramoeba, bei der Schaudinn das Auftreten von Flagellatenschwärmern mit Chromatophoren beschrieben hat, kann es sich, die Zusammengehörigkeit dieser beiden Formen vorausgesetzt, nicht um eine Amöbe handeln, sondern nur um ein amöboides Stadium eines Flagellats und zwar einer Cryptomonadine. Ebenso sind alle anderen „Amöben", die — wenn auch nur vorübergehend — in Flagellatenstadien übergehen können (sogenannte Schwimmformen), wohl richtiger aus der Ordnung Amoebina zu entfernen und bei den Flagellaten unterzubringen. Denn die Flagellatenorganisation ist bei diesen weit charakteristischer (vgl. den Artikel „Flagellata"). Auch manche andere „Amöbe" wird sich wohl bei näherem Studium als Entwickelungsstufe eines Protozoons von höherer Organisation erweisen und ist dann natürlich aus der Reihe der echten Amöben auszuschließen.

Eine echte Amöbine kann demnach als solche nur erkannt werden, wenn ihr Lebenszyklus ganz oder doch in seinen Hauptpunkten bekannt ist. Leider trifft das nur für sehr wenige Species zu, doch sind unsere Kenntnisse immerhin soweit fortgeschritten, daß wir einige ziemlich gut charakterisierte Gattungen aufstellen können.

Gattung **Amoeba** Ehr.

Große und sehr große freilebende Amöben, mit großem Kern, meist gut ausgebildetem alveolärem Caryosom und Außenkern. Als typisch für die Gattung kann Amoeba proteus (s. Fig. 1b, S. 422) gelten. Sie wird bis 500 μ groß und ist ausgezeichnet durch zahlreiche, dicke und lange Pseudopodien, die sie nach allen Seiten aussendet. Der Kern ist linsenförmig und besitzt ein scheibenförmiges Caryosom. Vermehrung durch Zweiteilung. Nach Scheel findet eine multiple Vermehrung in der Cyste statt, wobei 200 bis 250 kleine Amöben von etwas abweichendem Aussehen entstehen. Nach Calkins geht eine paarweise Kopulation der zahlreichen Kerne voraus, so daß die auskriechenden Amöben Zygoten wären.

Hierher gehören ferner die sogenannten Erdamöben, Formen mit stark ausgebildeter Pellicula und zahlreichen kurzen Pseudopodien. Die Tiere erhalten so ein faltiges, zerknülltes Aussehen. Als Beispiel seien genannt: Amoeba terricola, die in feuchtem Moos lebt, und die dauernd zweikernige Amoeba diploidea, deren interessante Kopulation oben geschildert wurde (s. Fig. 21 u. 22).

Gattung **Vahlkampfia** Chatton.

Gut charakterisierte Gruppe von kleinen, 5 bis 30 μ großen Amöben, die man bisher gewöhnlich unter dem Namen der Limaxgruppe (s. Fig. 1 a) vereinigte. Als charakteristisch gilt die Art der Bewegung durch Hinfließen der ganzen Amöbe nach einer Richtung mit Hilfe eines einzigen großen Pseudopodiums, was jedoch nicht immer zutrifft. Wichtiger ist jedoch die Kernstruktur; sie besitzen ein großes intensiv färbbares Caryosom und einen meist sehr schwach ausgebildeten Außenkern. Die Kernteilung verläuft unter dem Bilde einer Promitose mit starken chro-

matischen Polklappen und einer aus feinen Körnchen bestehenden Aequatorialplatte (vgl. den Artikel „Protozoa" Fig. 6 I). Bei der gleichen Art (Einzellenkultur) können auch typische Mitosen nur mit Zentriolen an den Polen vorkommen. Selten (Vahlkampfia hartmanni) ist die Ausbildung größerer Chromosomen in bestimmter Anzahl. Die Vermehrung geschieht stets durch Zweiteilung, multiple Teilung ist nicht beobachtet. Sämtliche Arten encystieren sich leicht in nach Bau und Aussehen charakteristischen Ruhecysten mit doppelter Membran. Geschlechtliche Vorgänge sind außer der oben (S. 429) beschriebenen Autogamie bei Vahlkampfia albida nirgends gefunden worden.

Die Gattung ist in zahlreichen Arten weit verbreitet. Alle wachsen gut auf künstlichen Nährböden und sind vielfach aus tierischen und menschliehen Fäces gezüchtet worden. Meist handelt es sich dabei wohl um Cysten, die mit der Nahrung den Darm passiert haben, doch scheint es auch einige parasitische oder halbparasitische Formen zu geben. Sie unterscheiden sich aber ohne weiteres von den rein parasitären Darmamöben.

Gattung Entamoeba Cas. u. Barbag.

Ziemlich einheitliche Gruppe rein parasitärer Amöben, die durch alle Klassen des Tierreiches verbreitet sind. Wichtig vor allem als Erreger der menschlichen Dysenterie. Eine Differenzierung in Ento- und Ektoplasma ist nicht bei allen Arten vorhanden, die Bewegung geschieht mittels lappiger Pseudopodien. Durch den Kernbau unterscheiden sie sich scharf von den übrigen Amöben, besonders den Vahlkampfien, mit denen sie wegen ihres Vorkommens häufig verwechselt wurden. Der Kern hat eine doppelt konturierte Kernmembran und enthält ein kleines Caryosom und einen sehr stark entwickelten Außenkern. Am Caryosom spielen sich zyklische Umsätze ab, die bei einzelnen Formen zu vollständiger Auflösung, des Caryosoms führen können (Entamoeba testudinis und blattae [Fig.5]). Bei Entamoeba coli kann eine multiple Teilung vorkommen, sonst nur Zweiteilung. Der Neuinfektion dienen Dauercysten, die stets mehrkernig sind und wahrscheinlich eine geschlechtliche Vermehrung darstellen nach der bei Entamoeba blattae beschriebenen Merogamie (s. Fig. 24, S. 430). Eine Autogamie wie sie früher angegeben wurde, findet wahrscheinlich nicht statt.

Entamoeba dysenteriae (forma tetragena) Councilman u. Lafleur em. Hartm. (Fig. 28) ist die normale Dysenterieamöbe des Menschen. Sie zeigt auch im Ruhezustand deutliches Ektoplasma (Fig. 28 a). Die Nahrung besteht hauptsächlich aus roten Blutkörperchen. Am Kern sind die für alle Entamöben charakteristischen zyklischen Umsetzungen besonders deutlich und gut ausgeprägt. Die Vermehrung erfolgt durch Zweiteilung, multiple Teilung kommt nicht vor. Cystenbildung findet sich

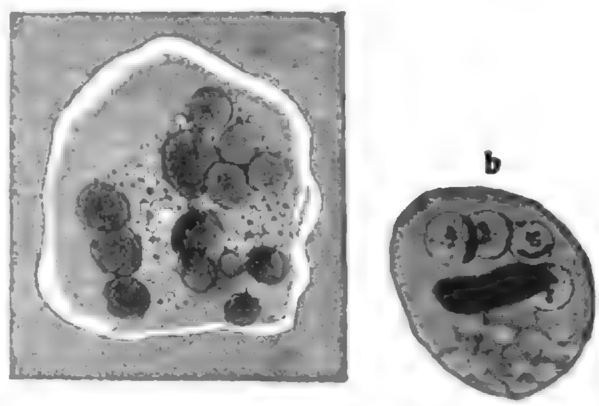


Fig. 28. Entamoeba dysenteriae (tetragena). a vegetativ nach dem Leben, b Cyste. Nach Hartmann.

nur selten und ist dann stets mit Chromidienbildung verknüpft. Die Cysten sind vierkernig und für Entamoeba tetragena charakteristisch (Fig. 28 b). Entamoeba dysenteriae, forma histolytica wurde als eine besondere Dysenterieamöbe des Menschen betrachtet. Neuere Untersuchungen haben es jedoch wahrscheinlich gemacht, daß sie nur eine Degenerationsform von Entamoeba tetragena ist. Außer dieser pathogenen Form kommt bei Menschen noch ein harmloser Darmparasit aus der Gattung Entamoeba vor, die Entamoeba coli. Sie unterscheidet sich durch ihren Kernbau, das Fehlen von Ektoplasma in der Ruhe, und vor allem durch ihre achtkernigen Cysten. Es kommen zuweilen auch 13- bis 16-kernige Cysten vor.

Gattung Pelomyxa Greef.

Große Amöben mit vielen Kernen, die sich mit Hilfe kurzer Bruchsackpseudopodien bewegen. Charakteristisch sind die Anhäufung von Steinchen und Bakterien im Plasma und die sogenannten Glanzkörper. Pelomxya palustris, mit vielen Kernen. Für diese Form hat Bott einen Entwickelungskreis mit heliozoenartigen Schwärmern beschrieben. Es handelt sich aber wahrscheinlich um Parasiten.

Den Amöben werden vielfach auch die oft heliozoenartige Pseudopodien aufweisenden Vampyrellen und Verwandte angereiht, während sie von andern den Myxomyceten genähert werden.

2. Ordnung. **Testacea** M. Schultze.

Auf die Schwierigkeiten einer natürlichen Abgrenzung der Testaceen oder Thecamöben von Amöben, wie von Foraminiferen wurde oben S. 432 schon hingewiesen. Wir können dieselben vorläufig als amöbenartige Rhizopoden mit einem, seltener mehreren monoenergiden Kernen charakterisieren, deren Körper häufig zonale Gliederung aufweist und in monaxonen Schalen mit einer, seltener zwei oder mehreren großen Oeffnungen eingeschlossen ist, durch die die lobosen, filosen, manchmal sogar leicht retikulosen Pseudopodien ausgestreckt werden.

Die Schalen bestehen entweder nur aus organischem Material, Pseudochitin, oder es sind Fremdkörper (Sandkörnchen, Diatomeenschalen usw.) oder aber im Körperplasma gebildete regelmäßig angeordnete Kieselplättchen eingelagert. Die pseudochitinigen Schalen können weich und völlig durchsichtig sein. Die Form der Schalen ist ziemlich einfach, urnen-, beutel-, schüsselförmig usw.

Das Körperplasma ist vielfach innerhalb der Schale in zwei Partien geteilt, die hintere mit dem Kern und feinwabigem Plasma, in das meist sogenannte Chromidien in Form von Netzen, Strängen usw., auch typische Reservestoffe eingelagert sind, und ein vorderes, grob alveolares, das der Verdauung dient. Die kontraktilen Vakuolen liegen meist an der Grenze der beiden Zonen. An der Schalenmündung findet sich häufig eine Ansammlung von Protoplasma ohne Inhaltsbestandteile, das sogenannte Pseudopodienplasma. Die in der Regel in der Einzahl vorhandenen monoenergiden Kerne sind entweder typische oder abgeleitete Caryosomkerne (s. Fig. 6, 8 u. 10) oder es sind alveoläre Kerne mit vielen Chromatinnukleolen. Die Vermehrung geschieht, falls die Schale weichhäutig ist, durch Längsteilung mit Durchschnürung der Schale, in der Regel durch „Knospungsteilung" (s. Fig. 18). Ferner sind agame multiple Vermehrungsvorgänge beschrieben mit Bildung nackter amöboider Sprößlinge und nachträglicher Schalenbildung. Für Arcella, Clamydophrys und Centropyxis sind auch entsprechende multiple Gametenbildungen (kleine Mikro- und Makrogameten, amöboid resp. begeißelt) angegeben, wobei die Gametenkerne aus den Chromidien entstehen sollen, während der Kern zugrunde geht. Die Verhältnisse sind aber noch nicht ganz sichergestellt. Bildung von einfachen Dauercysten ist bei den meisten Formen bekannt, Neigung zu plasmogamischer Verschmelzung speziell bei ungünstigen äußeren Lebensbedingungen ist bei dieser Gruppe besonders verbreitet.

Vielfach werden die Testaceen nach Art der Pseudopodien, Schalenbau usw. in einzelne Familien eingeteilt. Da jedoch von keiner Form die Entwickelung sicher bekannt ist, sehen wir von einer derartigen Gruppierung, die doch nur vorläufigen Charakter haben kann, ab und beschränken uns auf die Anführung einiger charakteristischer Gattungen in loser Reihenfolge.

Gattung **Pyxidicula** Ehr.

Mit napfförmiger Schale und einem Kern; ohne Chromidium. Pseudopodien lobos.

Gattung **Arcella** Ehr. (Fig. 29 u. 17).

Aehnlich, doch stets zwei oder mehr Kerne. Schale mit hexagonaler Felderung; netzförmiges Chromidium. Pseudopodien lobos.

Gattung **Difflugia** Ehr. (Fig. 30).

Schale aus Fremdkörpern, urnenförmig, sehr variierbar. Ein, zwei oder mehr Kerne ohne Caryosom. Chromidium. Lobose Pseudopodien.

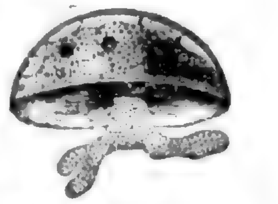


Fig. 29. Arcella vulgaris. Nach Hertwig und Lesser. Aus Lang.

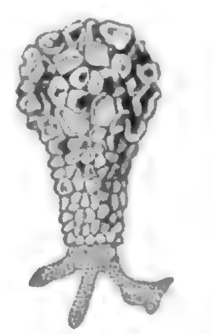


Fig. 30. Difflugia pyriformis. Nach Wallich. Aus Lang.

Gattung **Centropyxis** Stein.

Schale ähnlich wie bei der vorigen Gattung, doch mit Stacheln am Hinterende und exzentrischer Mündung. Kern s. Fig. 10 S. 425.

Gattung **Euglypha** Dujardin (s. Fig. 2 S. 423).

Eiförmige Schale aus dachziegelartig angeordneten Kieselplättchen. Pseudopodien filos.

Gattung **Chlamydophrys** Cienk (s. Fig. 6, 8 u. 18).

Flaschenförmige feine Schale aus Pseudochitin. Zonare Gliederung sehr deutlich; Kern mit großem Binnenkörper. Anastomosierende Pseudopodien.

Gattung **Microgromia** R. Hertwig (Fig. 31).

Sehr ähnlich der vorigen Gattung. Körper die Schale nicht ganz ausfüllend. Retikuläre Pseudopodien. Koloniale Verbände durch Vereinigung der Pseudopodien bildend. Tei-

lung in der Schale mit Ausschwärmen eines Tochtertieres, das 2 Geißeln bildet.

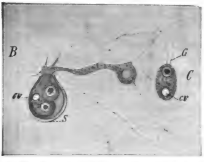


Fig. 31. Microgromia socialis. B Teilung innerhalb der Schale, C das eine Tochtertier ausgeschwärmt; S Schale, G Geißel, cv kontraktile Vakuole. Nach R. Hertwig. Aus Doflein.

3. Ordnung. **Foraminifera.**

Die Foraminiferen oder Thalamophoren sind fast ausschließlich marine Rhizopoden mit durchweg retikulosen Pseudopodien und mit Schalen von verschiedener Beschaffenheit ohne zonale Gliederung des Protoplasmaleibes. Letztere Eigenschaft unterscheidet sie von den Testaceen, dazu kommt noch als weiterer vielleicht wichtigster Unterschied in allen bisher bekannten Fällen eine Polyenergie im vegetativen Zustande, sei es in Form eines großen Polycaryons oder vieler kleinerer (mono- oder polyenergider) Kerne, sowie im Zusammenhang damit sowohl agam wie sexuell eine ausschließlich multiple Fortpflanzung und ein Generationswechsel. Diese Kern- und Fortpflanzungsverhältnisse, die im allgemeinen Teil S. 431 schon genauer besprochen wurden, werden vielleicht künftig nach genauerer Kenntnis der Entwickelung der primitiven Formen sowie der verwandten Testaceen als die Hauptcharaktere gelten müssen. Auch die von manchen Autoren (Rhumbler) vertretene Hinzuziehung einer Reihe großer nackter Rhizopoden mit retikulären Pseudopodien wird sich in der angedeuteten Weise dann wohl besser begründen lassen.

Alle typischen Foraminiferen besitzen Schalen. Bei primitiven Formen sind sie entweder weich gallertig mit oder ohne Einlagerung von Fremdkörpern oder fest, indem Fremdkörper durch Pseudochitin oder Kalk miteinander verkittet sind (sogenannte Sandschaler). Die höheren Formen (weitaus die Mehrzahl) besitzen Schalen aus Kalkspat. Die Schalen haben entweder nur eine oder einige wenige größere Oeffnungen (Imperforata) oder sie sind mehr oder minder gleichmäßig von feinen Poren durchsetzt, durch die die Pseudopodien austreten (Perforata). Der Schalenhohlraum ist entweder ungeteilt wie bei den Testaceen (monothalam) oder unregelmäßig gegliedert oder in mehrere regelmäßige Kammern geteilt (polythalam); zuweilen ist er von sekundärer Schalensubstanz unregelmäßig labyrinthisch erfüllt.

Die Form der Schale weist eine ganz ungeheure Mannigfaltigkeit auf.[1]) Rhumbler hat den interessanten Versuch unternommen, Form und Eigentümlichkeiten der Schalen mechanisch und durch Festigkeitsauslese zu erklären.

Die einzelnen Schalencharaktere sind nur mit großer Vorsicht bei der Systematik zu verwerten, da sich Uebergänge der verschiedenen Eigenschaften innerhalb derselben Gattung, ja sogar der gleichen Art finden. Am brauchbarsten erweist sich noch die Schalenform zur Aufstellung von Gruppen und Formenreihen. Die außerordentliche Variationsfähigkeit der Schale erschwert nicht nur die Aufstellung von natürlichen Gruppen, sondern macht vielfach sogar die Festlegung bestimmter Arten unsicher.

Da die Cytologie und Entwickelung nur von ganz wenigen Formen bekannt ist, so ist die Systematik fast völlig auf die Schalenverhältnisse angewiesen und darum in hohem Maße unsicher. Unter den verschiedenen systematischen Versuchen erscheint wohl als der natürlichste der von Rhumbler, der die beschalten Formen in die 10 folgenden Familien einteilt.

1. Familie. **Rhabdaminidae** Rhumbler.

Schale gallertig, pseudochitinig oder „Sandschale"; groß, einkammerig, oft verzweigt, strahlenförmig; mit einer oder wenigen Mündungen. Meist ein großer Polycaryon.

Myxotheca Schaudinn (Fig. 32), gallertige Hülle mit Fremdkörpern, kugelig, ein großer Kern (Polycaryon).

Saccamina Carpenter; Sandschale, Mündung mit kurzem Hals, kugelig, ein großer Polycaryon.

Rhabdamina Carpenter, stab- oder sternförmig (Fig. 33).

Allogromia Rhumbler (s. Fig. 3 S. 423). Testaceenartige Pseudochitinschale, doch retikulär und vielkernig.

2. Familie. **Ammodiscidae** Rhumbler.

Einkammerige, manchmal unregelmäßig segmentierte Röhren, mit mehr oder weniger spiraler Einrollung. Imperforat. Teils sand-, teils kalkschalig.

[1]) Ueber den Schalendimorphismus siehe im Allgemeinen Teil S. 431.

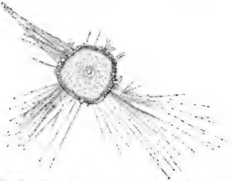


Fig. 32. Myxotheca arenigola Schaudinn. Nach Rhumbler.

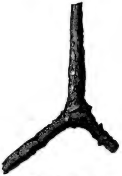


Fig. 33. Rhabdamina abyssorum. Nach Rhumbler.

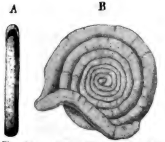


Fig. 34. Ammodiscus incertus von der Kante (A) und Ammodiscus temis von der Breitseite (B). Nach Brady. Aus Lang.

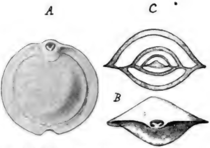


Fig. 37. Biloculina depressa. Aus Lang.

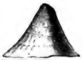


Fig. 35. Patellina corrugata. Nach Brady. Aus Lang.



Fig. 36. Nodulina nodulosa Brady. Nach Brady. Aus Lang.



Fig. 38. Lagena hispida Reuß. Nach Brady. Aus Doflein.

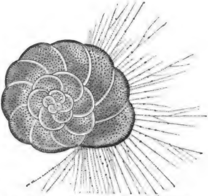


Fig. 39. Rotalia freyeri. Nach M. Schultze. Aus Lang.

Ammodiscus Reuss (Fig. 34), scheibenförmig in einer Ebene aufgerollte Sandschale.

Cornuspira M. Schulze, scheibenförmige Kalkschale.

3. Familie. **Spirillinidae** Rhumbler.

Spiral gewundene perforierte Kalkschalen, die in ihrer höchsten Entwickelung durch Ausbildung säckchenartiger Ausstülpung ihrer Röhrenwand kammerartige Räume bilden.

Patellina Will. Kegelförmige Schale (Fig. 35).

4. Familie. **Nodosinellidae** Rhumbler.

Schalen sandig oder mehr oder weniger kalkig. Perforat oder imperforat; polythalam, aus einer geraden oder nur wenig gebogenen Reihe von Kammern. Nach Rhumbler die Stammformen aller höheren Foraminiferen.

Nodulina Rhumbler (Fig. 36). Sandschale, stabförmige Kammerreihe.

5. Familie. **Miliolinidae** Brady em. Rhumbler.

Schale polythalam; imperforat (Ausnahme Endkammer von Peneroplis); meist kalkig, selten gemischt oder rein sandig; im Brackwasser chitinig oder chitinig-sandig; in großen Tiefen dünne kieselige Schalenhaut.

Calcituba Robor. Vereinfachte Form (Degeneration?) mit kalkiger, röhrenförmig verzweigter Schale. Viele polyenergide Kerne mit multipler Teilung.

Peneroplis Montfort, schneckenförmig aufgerollte Kalkschale. Fortpflanzung s. S. 431.

Miliolina Lam. mit den Untergattungen Biloculina, Triloculina und Quinqueloculina mit schneckenartiger Schale, deren äußere Kammern die früheren ganz umfassen, bei Biluculina (Fig. 37) zwei äußere Kammern, bei Triluculina drei und bei Quinqueloculina fünf.

6. Familie. **Orbitolitidae** Reuss em. Rhumbler.

Meist Kalkschalen; perforat oder imperforat. Zyklisches Wachstum der letzten Kammern. Kammern mit Sekundärwänden.

7. Familie. **Textularidae** Brady.

Schalen sandig, kalkig-sandig oder kalkig, meist perforat, selten imperforat. Kammern in zwei oder mehr alternierenden Reihen.

Textularia Defrance, zweireihige Schale.

8. Familie. **Nodosaridae** Rhumbler.

Fein perforierte Kalkschalen, Kammern perlschnurartig in gerader, gekrümmter oder planospiraler Anordnung.

Nodosaria Lamark, gerade oder gebogene Kammerreihe.

Lagena Walker u. Boys (Fig. 38), monothalam, da sich die neuen Kammern sofort abtrennen. Kammern flaschenförmig.

9. Familie. **Endothyridae** Rhumbler.

Planospirale oder doch nur um eine kurze Achse gewundene einreihige Formen. Perforat oder imperforat. Sandig, gemischt oder rein kalkig.

10. Familie. **Rotalidae** Brady em. Rhumbler.

Perforierte Kalkschalen; spiral entweder so aufgewunden, daß alle Kammern auf der oberen Fläche sichtbar sind, auf der unteren die Oeffnung enthaltenden, aber nur die des letzten Umgangs, oder so, daß beiderseits nur der letzte Umgang zu sehen ist. Schale oft unregelmäßig, bei höheren Formen mit Kanalsystem.

Rotalia Lamark (Fig. 39), flach schneckenförmig.

Globigerina d'Orbigny, pelagisch mit langen Schwebestacheln.

Polystomella Lamark, nautilusartige Schale. Cytologie und Entwickelung bekannt (s. S. 431).

Nummulites Lamark.

Anhang: **Xenophyophora** F. E. Schulze.

Den Foraminiferen werden von F. E. Schulze unter dem Namen Xenyophoren merkwürdige, verschieden gestaltete Organismen von erheblicher Größe (2—7 cm) angereiht, die sich in der Tiefsee finden. Sie bestehen aus einem Geflecht von Röhren, die durch allerhand Fremdkörper (Xenophya) verbunden sind. Die feineren Röhren enthalten vielkerniges Plasma, die größeren dunkelbraun gefärbte Kotballen.

2. Klasse. **Heliozoa** Häckel.

Die Heliozoen oder Sonnentierchen sind charakterisiert durch ihren kugeligen Körper mit den allseitig ausstrahlenden, fädig zugespitzten, meist ziemlich starren Pseudopodien. Die Festigkeit derselben ist in der Regel durch Achsenfäden bedingt (Axopodien). Diese dringen stets tiefer in das Körperplasma ein, sie endigen entweder an der Grenze von Ekto- und Entoplasma (Actinosphaerium), oder erst auf der Oberfläche des zentral gelegenen einzigen Kernes mit besonderen Fußplättchen (Actinophrys), oder sie stehen bei vielkernigen Formen mit je einem Kern durch eine kappenförmige Verbreiterung an ihrer Basis in Verbindung (Camptonema), und endlich können sie von einem zentral gelegenen kernartigen Zentralkorn, das zugleich als Zentrosom fungiert, ausgehen (Acanthocystis). An der Oberfläche

zeigen die Pseudopodien meistens eine deutliche Körnchenströmung, doch ist eine Anastomosenbildung selten. Die Pseudopodien sind zwar ziemlich beständig, doch können sie auch eingezogen werden nach zuvoriger Einschmelzung des Achsenfadens. Dies geschieht besonders bei der Aufnahme größerer Nahrungskörper, während kleinere Nahrungselemente direkt von der Körperoberfläche aufgenommen werden.

Am Körperplasma ist meistens ein grob alveoläres breites Ektoplasma deutlich vom Entoplasma geschieden, doch findet sich keine Zentralkapsel, wie bei den Radiolarien. Im Ektoplasma liegen hier auch die in Ein- oder Mehrzahl vorkommenden pulsierenden Vakuolen, die sich bei der Entleerung vorwölben. Das Ektoplasma unterscheidet sich somit wesentlich von dem homogenen, vakuolenfreien Ektoplasma der Amöben und wird vielfach als Rindenschicht bezeichnet, das Endoplasma dagegen als Markschicht.

Sehr verbreitet sind bei Heliozoen Hüll- und Skelettbildungen, die systematisch von großer Bedeutung sind. Im einfachsten Falle findet sich eine gallertige Hülle. Dieselbe zeigt vielfach eine körnige oder unregelmäßig fädige Struktur, oft ist sie mit Stacheln oder unregelmäßigen zackigen Lappen bedeckt. Bei manchen Formen sind Fremdkörper, wie Diatomeen und Sandkörner, in die Gallerthülle eingelagert, bei anderen werden vom Körperplasma gebildete Kieselskelette zum Bau der Hülle verwendet. Die einzelnen Kieselelemente sind sehr mannigfaltig, aber für die einzelnen Arten in charakteristischer Weise gestaltet, so gibt es Kugeln, Scheiben, Plättchen, verschiedenartige solide Nadeln und hohle Stacheln. Die Clathrulinen besitzen kieselige Gitterschalen, ähnlich wie viele Radiolarien (Fig. 40).

Die Kerne haben entweder ein großes alveoläres Caryosom oder letzteres ist aufgelöst, wodurch ein gleichmäßiger retikulärer Bau entsteht. Es gibt sowohl einkernige wie mehrkernige Formen, ferner solche, die neben dem Kern einen kernartigen Zentralkörper enthalten. Die Vermehrung geschieht durch Teilung, Knospung, innere Knospung und Zerfallteilung. Befruchtung in Form von Autogamie, Hologamie und Merogamie. Weit verbreitet ist Koloniebildung.

Die ganze Unterklasse ist nicht umfangreich und läßt sich trotz vielfacher Beziehungen zu anderen Rhizopodengruppen als homogen zusammengesetzter Zweig gut abgrenzen. Nach unten hin sind sie mit Amöben durch Formen wie Nuclearia usw., mit Flagellaten durch Dimorpha sowie geißeltragende Fortpflanzungskörper verbunden, nach oben hin finden wir wohl in den Radiolarien die Weiterentwickelung.

Gewöhnlich werden die Heliozoen nach Vorhandensein, wie Beschaffenheit und Gestalt der Hüll- und Skelettbildungen in 4 Ordnungen oder Familien eingeteilt. Den Hüll- und Skelettbildungen kann aber auch hier keine so große systematische Bedeutung zuerkannt werden, ebensowenig wie z. B. be den Gruppen der Flagellaten. In erster Linie werden wohl die Kernverhältnisse, vor allem das Fehlen oder Vorhandensein eines besonderen Zentralkornes, sowie die Entwickelung für die Unterscheidung der Hauptgruppen von Wichtigkeit sein. Leider sind in dieser Beziehung nur wenige Formen genauer untersucht. Wir wollen hier provisorisch 3 Ordnungen unterscheiden:

1. Actinophrydea, nackte oder mit Hülle versehene Formen ohne Zentralkorn.

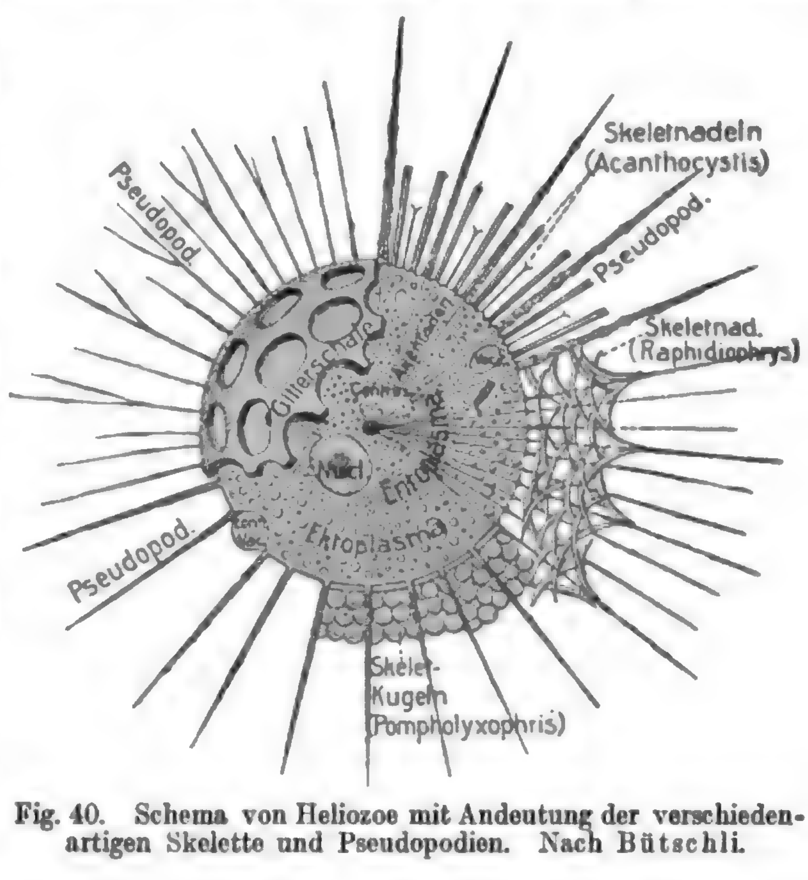


Fig. 40. Schema von Heliozoe mit Andeutung der verschiedenartigen Skelette und Pseudopodien. Nach Bütschli.

2. Acanthocystidea, nackte oder mit Hülle und Skeletten versehene Formen mit Zentralkorn.

3. Clathrulinidea, Form mit kieseliger oder chitiniger Gitterkugel.

1. Ordnung. **Actinophrydea** nom. nov.

In diese Ordnung stellen wir sämtliche Formen ohne Zentralkorn und ohne Gitterkugel, ob sie nun vollkommen nackt sind oder eine Gallerthülle oder Kieselskelette besitzen. Die letzteren Charaktere können eventuell zur Aufstellung von Familien herangezogen werden. Fortpflanzung durch Teilung, Befruchtung in Form von Hologamie, auch pädogam (s. oben S. 429).

Gattung **Actinophrys** Ehr.

Nackte Formen mit undeutlicher Sonderung von Ekto- und Endoplasma, eine kontraktile Vakuole; Pseudopodien mit Achsenfäden, die bis an den zentral gelegenen Kern reichen und hier auf sogenannten Fußplättchen aufsitzen. Vermehrung durch Zweiteilung. Kopulation isogame Hologamie (auch pädogam) innerhalb von Cysten. Oft koloniebildend. — Actinophrys sol Ehr. Süßwasser.

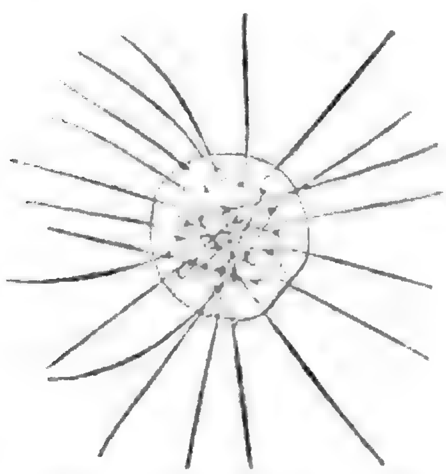


Fig. 41. Camptonema mutans. Nach Schaudinn. Aus Lang.

Gattung **Camptonema** Schaudinn.

Die durch die eine Art Camptonema mutans Schaud. (Fig. 41) repräsentierte Gattung gleicht der vorigen im Bau des Plasma, unterscheidet sich aber durch den Besitz von vielen Kernen, von denen von kappenartigen Aufsätzen aus die Achsenfäden ausgehen. Die Pseudopodien können bei Berührung umknicken und so Nahrungskörper aufnehmen. Marin.

Gattung **Actinosphaerium** Stein.

Actinosphaerium eichhorni Ehr. (Fig. 42), ist ebenfalls vielkernig (bis über 200), zeigt aber eine deutliche Sonderung von Ento- und Ektoplasma, in welch letzterem sich 2 bis 14 kontraktile Vakuolen finden. Die Achsenfäden der Pseudopodien reichen nicht bis zu den Kernen, sondern nur wenig bis ins Entoplasma. Vermehrung durch Plasmatomie, Befruchtung pädogame Isogamie (s. oben S. 430, Fig. 23). Süßwasser.

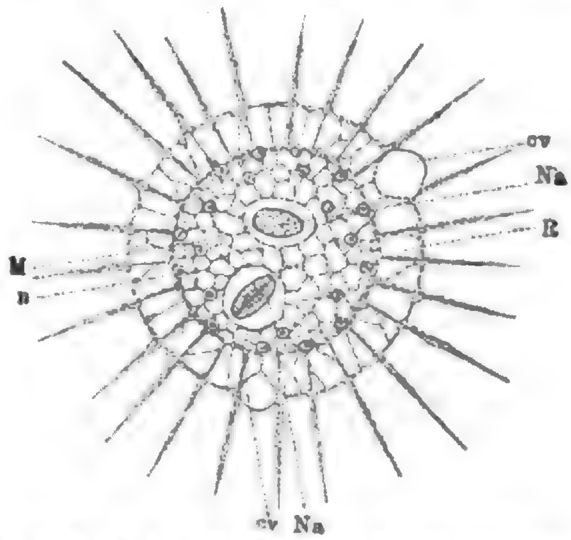


Fig. 42. Actinosphaerium eichhorni. Nach R. Hertwig.

2. Ordnung. **Acanthocystidea** nom. nov.

Diese Gruppe fassen wir viel weiter als gewöhnlich, indem wir hierher alle Formen mit Zentralkorn stellen, auch wenn sie nackt sind oder nur schleimige Hüllen besitzen. Vermehrung durch Zweiteilung, Knospung und multiple Teilung. Zweigeißelige Schwärmer, die eventuell Gameten darstellen, von manchen Arten bekannt.

Gattung **Dimorpha** Gruber.

Dimorpha mutans Grub. der einzige Vertreter dieser Gattung, ist bisher meist bei den Flagellaten (Rhizomastiginen) eingereiht worden. Das Tier besitzt nämlich 2 Geißeln und kann nach Einziehung seiner Pseudopodien (typischer Axopodien) unter Annahme ovaler Form umherschwimmen. Seine ganze Organisation ist aber sonst vollkommen heliozoenartig und zwar gehört es wegen des Besitzes eines Zentralkornes in die Gruppe der Acanthocystiden. Von dem Zentralkorn entspringen auch die beiden Geißeln. Oberfläche nackt, ohne deutliche Differenzierung in Ekto- und Entoplasma. Kontraktile Vakuole an der Oberfläche. Süßwasser.

Gattung **Gymnophrys** Sasaki.

Nackte Form mit deutlicher Rindenschicht und mit vielen Kernen, jedoch einem Zentralkorn, von dem die Achsenfäden der Pseudopodien ausgehen. Vermehrung durch Plasmotomie, wobei jedoch das Zentralkorn sich durch eine Zentralspindel teilt und einen gewissen Einfluß auf die Teilung auszuüben scheint. Marin. Eine Art.

Gattung **Sphaerastrum** Greef.

Kleine kugelige Formen mit gallertiger

Hülle, einem seitlich verschobenen Kern und Zentralkorn. Oft koloniebildend. Sphaerastrum fokei Arch. Sumpfwasser.

Gattung **Raphidiophrys** Archer.

Diese Gattung besitzt eine ziemlich feste Hülle mit Kieselnadeln (s. Fig. 40). Differenzierung in Ekto- und Entoplasma undeutlich. Süßwasserformen. Raphidiophrys pallida F. E. Schulze.

Gattung **Ancanthocystis** Carter.

Die Gattung ist durch eine scharfe Sonderung der Markschicht (Entoplasma) charakterisiert. Radiär mannigfach gestaltete Nadeln und Röhren; bei manchen Arten Hülle mit tangentialen Plättchen. Fortpflanzung durch Teilung und Knospung. Bildung zweigeißeliger Schwärmer (Gameten?). Marine und Süßwasserarten (s. Fig. 11, S. 425 u. Fig. 13, S. 426).

|Gattung **Wagnerella** Mereschkovsky.

Wagnerella borealis Mereschk. (Fig. 43, Fig. 12 u. 19). Festsitzend gestielte Form,



Fig. 43. Wagnerella borealis. Nach Zülzer. Aus Doflein.

mit verbreiterter und verdickter Basis, in der der polyenergide Kern liegt, während der kugelige Kopf, von dem die Axopodien ausstrahlen, das Zentralkorn enthält. Plasma von Basis und Stiel von fester eiweißartiger Hülle umgeben, in der bogenförmige kleine Kieselnadeln eingelagert sind. Kopf mit Gallerthülle und radial gestellten geraden Nadeln. Bei der Vermehrung durch Teilung, die sich mehrfach wiederholen kann, rückt der polyenergide Kern in den Kopf (s. Fig. 12 S. 426), bei der endogenen Knospung lösen sich nur Einzelkerne von ihm ab und werden im Kopf zu den Knospenkernen (s. Fig. 19). Ferner kommt multiple Kernteilung vor, die zur Ausbildung zweigeißeliger Schwärmer (Gameten?) führt. Die Form tritt in 2 Typen auf, dicke und dünne Generation, von denen es unentschieden ist, ob es sich um 2 Generationen derselben Art (geschlechtliche und ungeschlechtliche) oder um verschiedene Arten handelt. Marin.

3. Ordnung. **Clathrulinidea.**

Diese Gruppe behalten wir provisorisch für die Formen bei, die eine kieselige oder pseudochitinige Gitterkugel besitzen. Vermutlich werden die Formen später einer der vorigen zugerechnet oder auf sie verteilt werden können, wenn sie genauer untersucht sind.

Gattung **Clathrulina** Cienk.

Gestielte Formen mit Gitterkugel. Ekto- und Entoplasma undeutlich getrennt. Kern zentral (was für die Zugehörigkeit zu den Actinophrydea spricht). Fortpflanzung durch Teilung und Ausschlüpfen eines zweigeißeligen Schwärmers. Süßwasser. Clathrulina elegans Cienk.

3. Klasse. **Radiolaria** Joh. Müller.

Die Radiolarien besitzen gleich den Heliozoen eine kugelige Grundgestalt, die jedoch vielfach starke Abweichungen aufweist. Der Hauptcharakter der Klasse ist durch das Vorhandensein einer Zentralkapsel gegeben, welche den größten Teil des Protoplasmas umschließt und so den Körper in ein extrakapsuläres und intrakapsuläres Plasma trennt, die beide etwa dem Ekto- und Entoplasma der Heliozoen entsprechen. Das extrakapsuläre Plasma ist von einer Gallerthülle (Calymna) umschlossen, teilweise auch mit Gallerte durchsetzt. Von der Oberfläche der Calymna entspringen die feinfädigen, nur schwach anastomosierenden Pseudopodien, die in der Regel Körnchenströmung aufweisen.

Die Kapselmembran ist eine organische Bildung (Pseudochitin) und bei den primitiven Formen äußerst dünnwandig,

kugelig und allseitig von feinen Poren durchsetzt, durch die die beiden Plasmateile miteinander kommunizieren. Nach Herausschälen der Zentralkapsel kann das Zentralkapselplasma ein neues Extrakapsularium völlig restituieren. Bei weiter entwickelten Formen weist die Zentralkapsel vielfach äußerlich schon eine monaxone Gestalt auf. Die Poren sind dann auf ein sogenanntes Porenfeld beschränkt (Nassellarien Fig. 44b), oder es bestehen nur 1 bis 3 größere Oeffnungen in der deutlich doppelwandigen Kapsel (Phaeodarien Fig. 44a).

Mit wenigen Ausnahmen besitzen die Radiolarien in ihrem extra- wie intrakapsulären Plasma mannigfaltig gestaltete Skelettbildungen, die in der Regel aus Kieselsäure bestehen, nur bei den Acantharien aus schwefelsaurem Strontium. Im einfachsten Falle sind es lose Kieselnadeln (Spicula) von verschiedener Gestalt, die meist um die Zentralkapsel gelagert sind. Sehr häufig sind Gitterkugeln, davon oft mehrere ineinander geschachtelt und durch Balken miteinander verbunden. Die zusammenhängenden durchbrochenen Gitterskelette können auch monaxone oder bilaterale Gestalten (helmartige) annehmen und dadurch dem Tiere diese Form aufprägen. Die Mannigfaltigkeit der Formen ist eine ganz außerordentliche.

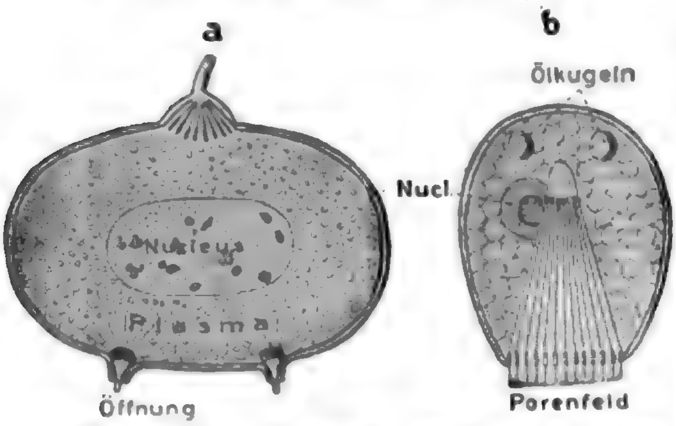


Fig. 44. Zentralkapsel a einer Phäodarie (Tripylee), b einer Nassellarie. Nach R. Hertwig. Aus Bütschli.

Erheblich abweichend sind die ja auch chemisch differenten Skelette der Acantharien. Dieselben bestehen aus radiär angeordneten Stacheln, die bis zum Zentrum reichen und hier entweder verwachsen oder nur fest zusammengestemmt sind. Bei den höheren Formen der Acantharien sind 20 Radialstacheln konstant in bestimmter Weise (sogenannte Müllersche Regel) angeordnet, indem je 4 in 5 parallelen Kreisen an der Kugeloberfläche der Tiere austreten, 4 im äquatorialen Kreis, je 4 in den beiden Wende- und je 4 in den beiden Polarkreisen. Während die Stacheln des Aequators und der Polarkreise auf denselben Meridianlinien stehen, sind die der Wendekreise in den dazwischenliegenden Meridianlinien angeordnet. Durch verschiedene Größe, Ausbildung von Dornen, Anastomosen usw. wird auch hier eine außerordentliche Mannigfaltigkeit erzielt, sekundär können auf diese Weise einfache oder mehrere durch radiäre Pfeiler verbundene Gitterkugeln zustandekommen.

Im Plasma der Radiolarien finden sich verschiedene Inhaltsbestandteile, so vor allem Oelkugeln, Pigment, Eiweißkonkretionen. Sehr häufig sind symbiotische Xooxanthellen, die im Extrakapsularium liegen.

Alle cytologisch genauer untersuchten Formen haben entweder viele monoenergide Caryosomkerne oder aber einen einzigen großen polyenergiden Kern. Doch ist anzunehmen, daß unter den kleinen Sphaerellarien, sowie anderen Formen auch einkernige Arten weit verbreitet sind. Ueber die Kernvermehrung siehe im Allgemeinen Teil.

Eine vegetative Vermehrung durch Zweiteilung ist nur bei den vielkernigen Individuen der Sphaerozoen, sowie bei Tripyleen und Acantharien bekannt. Sonst vollzieht sich die Vermehrung wohl hauptsächlich durch multiple Teilung. Die spärlich vorliegenden Befunde darüber sind im Allgemeinen Teil zu finden.

Die Radiolarien sind fast ausschließlich marine pelagische Tiere, die in allen Schichten bis zu 5000 m Tiefe vorkommen.

Man teilt die Radiolarien nach dem Bau der Kapselmembran und der Art des Skeletts in 4 wohl ziemlich natürliche Ordnungen:

1. Spumellaria.
2. Acantharia.
3. Nassellaria.
4. Phaeodaria.

Die weitere Gliederung der ungeheuer vielgestaltigen Gruppen (es wurden von Häckel 739 Gattungen mit 4318 Arten unterschieden) ist fast völlig auf das Skelett begründet und dürfte zum großen Teil recht künstlich sein. Natürlich ist wohl die Einteilung der Polycyttarien und Monocyttarien, die einzigen Gruppen, die cytologisch und entwickelungsgeschichtlich einigermaßen bekannt sind.

1. Ordnung. Spumellaria Haeckel.

Die Spumellarien besitzen eine meist kugelige, allseitig mit Poren versehene Zentralkapsel. Das Skelett, das vielfach ganz fehlt, ist meist einfach gestaltet; Nadeln, Gitterkugeln, auch abgeplattete. Von den 3 Unterordnungen weisen die Polycyttarien oder

Sphaerozoen viele monoenergide Kerne, die Monocyttarien oder Collodarien einen riesigen Polycaryon auf, während die kleinen Sphaerellarien monoenergid zu sein scheinen. Die Polycyttarien sind koloniebildend.

1. Unterordnung. **Sphaerellaria** Haeckel.

Meist kleine Formen (monoenergid?) mit Gitterkugel oder aus verzweigten usw. Einzelelementen bestehendem Skelett. Ueber Kerne und Fortpflanzung nichts Näheres bekannt.

1. Familie. **Sphaeroidae** Haeckel.

Zentralkapsel kugelig; Skelett einfache oder mehrere konzentrische Gitterkugeln.

2. Familie. **Prunoidae** Haeckel.

Skelett wie bei der vorigen Familie, jedoch samt Zentralkapsel von elliptischer oder zylindrischer Gestalt.

3. Familie. **Discoidae** Haeckel.

Aehnliche Skelettverhältnisse, jedoch abgeplattet, linsenförmig.

4. Familie. **Largoidae** Haeckel.

Formen langgestreckt wie die Prunoiden, aber zugleich abgeplattet wie die Discoiden, also mit 3 verschiedenen Achsen.

2. Unterordnung. **Polycyttaria** Haeckel em. Brandt.

Die Polycyttarien sind koloniebildende Formen; die einzelnen Zentralkapseln (Individuen) sind in eine gemeinsame Gallerte eingebettet, in der das extrakapsulare Plasma der Einzelindividuen plasmodienartig durch Anastomosen miteinander verbunden ist und von deren Oberfläche die gemeinsamen Pseudopodien entspringen. Kolonien kugelig, elliptisch, bandförmig. Individuen mit vielen monoenergiden Kernen (s. S. 424, Fig. 7) und Oelkugeln. Vermehrung durch Plasmotomie, Iso- und Anisosporenbildung (Näheres s. oben S. 428 u. 432).

Man unterscheidet 2 Familien.

1. Familie. **Sphaerozoidae** Haeckel em. Brandt.

Skelett, wenn vorhanden, aus losen Nadeln bestehend, die die Zentralkapsel tangential umgeben. Mikro- und Makrogameten werden in denselben Individuen gebildet. Collozoum inerme, zylindrische Kolonie ohne Nadeln. Sphaerozoum, kugelige Kolonie mit Nadeln.

2. Familie. **Collosphaeridae** Joh. Müller em. Brandt.

Ohne Skelett (Myxosphaera) oder mit Gitterkugel (Collosphaera). Mikro- und Makrogameten werden von verschiedenen Individuen gebildet.

3. Unterordnung. **Monocyttaria** Haeckel em. Brandt.

Große einzellebende, meist kugelige Radiolarien mit großem polyenergidem Kern. Skelett fehlt vielfach, wenn vorhanden, einfache Nadeln, nur bei Orosphaeriden Gitterkugel mit Stacheln. Die oft mehrere Zentimeter großen Tiere entsprechen einer ganzen Kolonie der Polycyttarien; Thalassophysa wandelt sich bei der Sporenbildung direkt in eine sphaerozoenartige Kolonie um nach Zerfall des Polycaryons und multipler Zerschnürung der Zentralkapsel. Fortpflanzung nur durch Sporenbildung (Genaueres siehe oben S. 429 Fig. 20).

1. Familie. **Physematidae** Brandt.

Formen mit großer, dünner Zentralkapsel, deren intrakapsuläres Plasma mit Hohlräumen durchsetzt ist nach Art von Pflanzenzellen.

2. Familie. **Thalassicollidae** Haeckel em. Brandt.

Formen mit kugeligem Kern. Zentralkapsel derb, oft aus polygonalen Stücken zusammengesetzt. Große extrakapsuläre Vakuolen. Oft Pigment um die Zentralkapsel. Zweierlei Arten der Schwärmerbildung. Thalassicolla.

3. Familie. **Thalassophysidae** Brandt.

Kern mit radialen Aussackungen, derbe Zentralkapsel; geht bei der Schwärmerbildung in einen kolonialen Zustand über.

4. Familie. **Thalassothamnidae** Häcker.

Große Formen mit einer einzigen verzweigten Riesendoppelnadel und kugeliger oder verzweigter Zentralkapsel. Thalassothamnus Häcker, Cytocladus Schröder.

5. Familie. **Orosphaeridae** Haeckel.

Formen mit Gitterschale und bedornten Radialstacheln. Schwärmerbildung, auch Formen mit 2 bis 5 Zentralkapseln (vegetative Teilung?) beobachtet. Oroscena.

2. Ordnung. **Acantharia** Haeckel.

Die Acantharien sind vor allen anderen Radiolarien durch die chemische Beschaffenheit wie die morphologische Ausbildung ihres Skeletts ausgezeichnet (s. oben S. 442). Die Zentralkapsel ist wie bei den Spumellarien allseitig durchbohrt und ist wohl infolge der sie durchbohrenden Radialstacheln oft polygonal unregelmäßig. An den Stacheln sitzen Bündel von muskelähnlichen, kontraktilen Organellen (Myophrisken), die die Stacheln mit der Calymna fest verbinden und durch ihre Kontraktionen das Körpervolumen vergrößern und so durch ihre Tätig-

keit das Auf- und Absteigen ermöglichen. Die meisten Acantharien sind vielkernig. Vermehrung durch Plasmotomie, meist wohl jedoch durch Schwärmerbildung.

1. Familie. **Actinellidae** Haeckel.

Formen mit nicht nach bestimmten Regeln angeordneten Stacheln von meist großer Anzahl.

2. Familie. **Acantharidae** Haeckel.

Formen mit 20 ziemlich gleichlangen, nach der Müllerschen Regel angeordneten

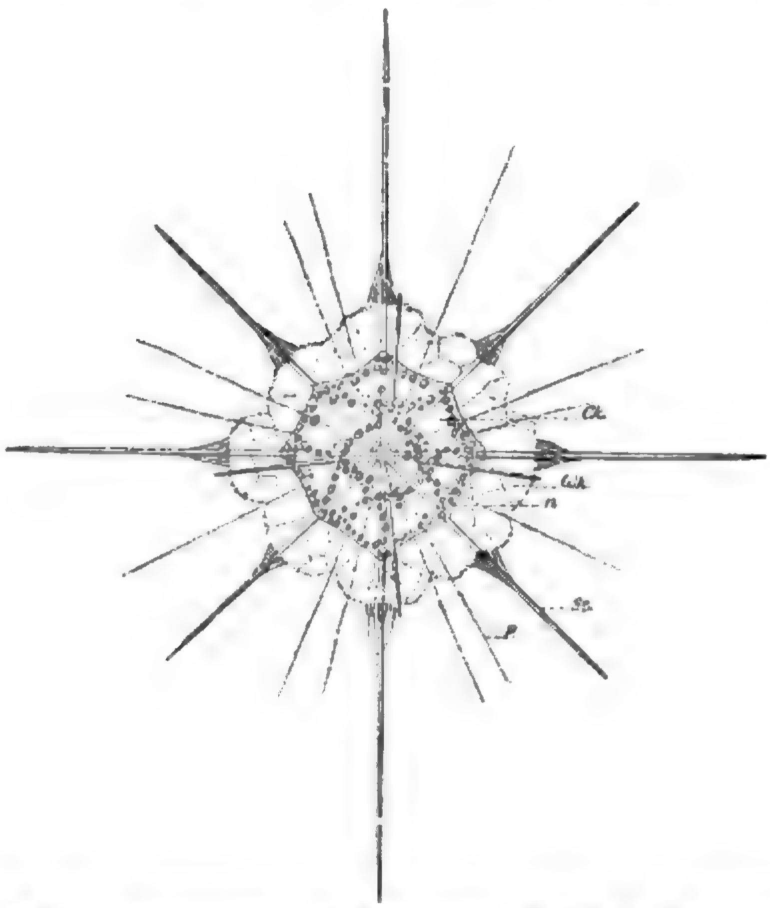


Fig. 45. Acanthomethra elastica. Nach R. Hertwig.

Stacheln. Acanthometra elastica Joh. Müller (Fig. 45).

3. Familie. **Sphaeropractidae** Haeckel.

Formen mit ebenfalls 20 ziemlich gleichlangen, nach der Müllerschen Regel angeordneten Stacheln, die jedoch in gleichmäßigem Abstand vom Zentrum verästelte Fortsätze besitzen, die zu konzentrischen Gitterkugeln verschmelzen können.

4. Familie. **Prunophractidae** Haeckel.

Aehnlich wie die vorige Familie, jedoch 2 oder 6 Stacheln erheblich länger als die übrigen, wodurch langgestreckte Formen entstehen, wobei sich die Streckung auch auf Zentralkapsel und Gitterkugel erstreckt. Diplocolpus cristatus Haeckel (Fig. 46).

3. Ordnung. **Nassellaria** Ehr. em. Haeckel.

Die Nassellarien oder Monopylarien sind Radiolarien mit monaxoner, nur an einer Stelle, dem Porenfeld, durchbohrter Zentralkapsel und exzentrisch liegendem Kern (polyenergid?). Die Grundlage des Skeletts sind ein sogenannter Dreifuß und 2 Ringe, aus denen bei höheren Formen eine monaxone gitterförmige Schale (Köpfchen) sich entwickelt (Fig. 47); an der Basis desselben können sich ringförmige Glieder ansetzen.

1. Familie. **Nassoidae** Haeckel.

Skelettlose Formen.

2. Familie. **Plectoidae** Haeckel.

Formen ohne Gitterschale und Ringe, jedoch mit oft verzweigtem Dreifuß.

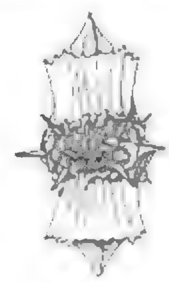


Fig. 46. Diplocolpus cristatus Haeck. Nach Haeckel. Aus Doflein.

3. Familie. **Stephoidae** Haeckel.

Nur mit Ringen ausgestattete Formen. Zygostephanus Haeck.

4. Familie. **Cystoidae** Haeckel.

Mit Köpfchen und Dreifuß. Eucystidium.

5. Familie. **Spyroidae** Ehrenberg.

Aehnlich wie die vorige Familie, jedoch Köpfchen durch sagittale Einschnürung bilateral.

6. Familie. **Botryoidae** Haeckel.

Wie die vorige Familie, jedoch mit drei oder mehr sagittalen Einschnürungen.

4. Ordnung. **Trypylea** R. Hertwig.

Die Zentralkapsel der Trypylen besitzt eine Hauptöffnung (Astropyle) und meist

zwei derselben gegenüberliegende Nebenöffnungen (Parapylen) (Fig. 44). Skelett sehr mannigfaltig. Die in Einzahl vorhandenen Kerne sind polyenergid (oft über 1000 Se-

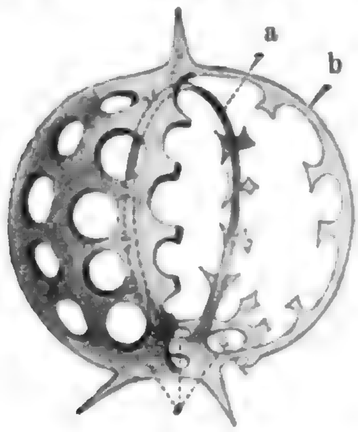


Fig. 47. Schema zur Erläuterung des Skeletts der Nassellarien. a primärer Skelettring, b der hierauf senkrechte sekundäre, c die drei Basallöcher. Rechts primitive Form, links kompliziertere, deren Gitterwand aus der Bestachelung der Ringe entsteht. Nach Bütschli.

kundärkerne). Vermehrung durch einmalige oder mehrmalige Zweiteilung, ferner Gametenbildung (s. oben S. 427, Fig. 15).

1. Legion. **Phaeocystina** Haeckel.

Skelettlos oder Skelette aus hohlen Radialstacheln.

1. Familie. **Aulacanthidae** Haeckel.

Skelett aus hohlen Radialstacheln und einem Mantel von feinen tangentialen Röhren.

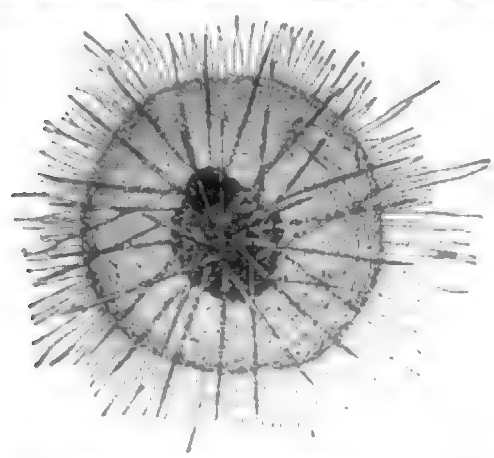


Fig 48. Aulacantha scolymantha. Nach Doflein.

Aulacantha scolymantha (Fig. 48 und Fig. 15 u. 16, S. 427).

2. Familie. **Astracanthidae** Haeckel.

Radialstacheln mit verschieden gestalteten Enden, die von der Oberfläche einer zentralen Hohlkugel entspringen. Zwei Zentralkapseln.

2. Legion. **Phaeosphaeria** Haeckel.

Skelett aus einer oder zwei Gitterschalen.

3. Familie. **Aulosphaeridae** Haeckel.

Einfache Gitterschale aus Röhren zusammengesetzt. Aulosphaera.

4. Familie. **Cannosphaeridae** Haeckel.

Zwei konzentrische durch Radialbalken verbundene Schalen; innere mit Pylomöffnung.

5. Familie. **Sagosphaeridae** Haeckel.

Eine oder zwei konzentrische Gitterschalen aus soliden, aber biegsamen Balken.

3. Legion. **Phaeocalpia** Haeckel.

Eine monaxone Schale mit Pylomöffnung und allseitig oder kranzförmig angeordneten Radialstacheln.

6. Familie. **Castanellidae** Haeckel.

Kugelige Schale mit gleichmäßig verteilten Poren und allseitig angeordneten Radialstacheln.

7. Familie. **Circoporidae** Haeckel.

Kugelige oder polyedrische Schale mit Porenkränzen an der Basis der in geringer Zahl und geometrischer Anordnung sich findenden Radialstacheln; letztere terminal verästelt.

8. Familie. **Tuscaroridae** Haeckel.

Schale meist flaschenförmig, mit engen Poren, wenige lange, in 1 bis 2 Kränzen angeordnete Radialstacheln.

9. Familie. **Poraspathidae** Borgert.

Schale skulpturiert (Papillen oder trigonales Leistensystem). Radialstacheln allseitig angeordnet.

4. Legion. **Phaeogromia** Haeckel em. Häcker.

Schale bilateral-symmetrisch mit Pylomöffnung, Radialstacheln bestimmt lokalisiert.

10. Familie. **Challengeridae** G. Murray.

Schale mit „Diatomeenstruktur“; einseitige Peristombildung; Radialstacheln, wenn vorhanden, in der Medianebene oder (seltener) am aboralen Pol. Challengeron armatum Borgert (Fig. 49).

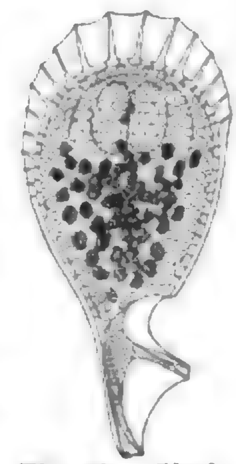


Fig. 49. Challengeron armatum Borgert. Nach Häcker Aus Doflein.

11. Familie. **Medussetidae** Haeckel.

Schale oft skulpturiert; Radialstacheln nur um den Pylomrand, gekammert. Euphysetta elegans Borgert.

5. Legion. **Phaeoconchia** Haeckel em. Häcker.

Schale aus 2 dickwandigen, von Poren durchsetzten Klappen bestehend.

12. Familie. **Concharidae** Haeckel.

6. Legion. **Phaeodendria** Häcker.

Schale aus 2 dünnwandigen Klappen mit je einem, mit verzweigten Röhren besetztem Helmansatz.

13. Familie. **Coelodendridae** Haeckel em. Häcker.

Literatur. *Lehr- und Handbücher, in denen sich die weitere Literatur findet:* **O. Bütschli,** *Protozoa, in: Bronn, Klassen und Ordnungen des Tierreichs.* — **Doflein,** *Lehrbuch der Protozoenkunde. 3. Aufl. Jena (hier die neuere Literatur ziemlich vollständig).* — **Lang,** *Vergleichende Anatomie, 2. Aufl., 1. Lief.* — *Ferner* **M. Hartmann** *(1913), Morphologie und Systematik der Amöben, in: Kolle und Wassermann, Handbuch der pathogenen Mikroorganismen, 7. Bd., 2. Aufl. Jena.*

M. Hartmann.

Rhizopoda.

Paläontologie.

1. Foraminiferen. a) Allgemeines. b) Uebersicht über die fossilen Foraminiferen. c) Geologische Bedeutung der fossilen Foraminiferen. 2. Uebersicht über die fossilen Radiolarien. Geologische Bedeutung derselben.

Von den vier Ordnungen der Rhizopoden besitzen erhaltungsfähige Hartgebilde die Foraminiferen, die Heliozoen und die Radiolarien. Nur diese sind fossil bekannt und zwar die Foraminiferen und die Radiolarien seit dem Präkambrium, die Heliozoen nur aus dem Diluvium.

1. Foraminiferen. 1a) Allgemeines. Es ist bisher nicht oder doch nur sehr unvollständig gelungen, ein natürliches System der Foraminiferen aus ihrem geologischen Vorkommen abzuleiten. So ist denn das, was über die Stammesgeschichte der Foraminiferen bekannt ist, noch äußerst hypothetisch. Das liegt einmal daran, daß gerade die ältesten Formationen nur wenig brauchbares Material geliefert haben und daß bei dem recht einfachen Bau vieler Formen „Neubildungen" zu verschiedenen geologischen Zeiten entstanden sind. Immerhin läßt sich ein Fortschritt im Bauplan der fossilen Foraminiferen von den ältesten bis zu den jüngsten Formen recht deutlich erkennen. Der Fortschritt bedeutet eine gesteigerte Festigkeit der Schalenstruktur und des Schalenbaues.[1]) Die allereinfachsten und niedrigsten Formen bauen ein Gehäuse aus lose oder festverkitteten Sandkörnern (agglutinierende Formen). Sie sind durch Uebergänge mit rein kalkschaligen Foraminiferen verbunden, deren Schale entweder von Poren durchbohrt oder nicht durchbohrt ist. Danach sind die Foraminiferen eingeteilt in a) Perforata und b) Imperforata. Daß eine derartige Einteilung undurchführbar ist, zeigt allein schon der Umstand, daß in ein und derselben Gattung perforate und imperforate Formen vorhanden sein können.

Andererseits sind aus dem Präkambrium einfache kugelförmige Gehäuse entweder einzeln oder zu Gruppen vereinigt (a. Globigerinen-Typus) beschrieben. Im Silur erscheint ein weiterer Typus, bei dem die noch kugeligen Kammern ± regelmäßig um eine lange Achse entweder einzeilig (b. Nodosaria-Typus) oder mehrzeilig (c. Polymorphina-Textularia-Typus) vereinigt sind. Ganz vereinzelt tritt im älteren Paläozoikum schon der d) nautiloide Typus hervor, dadurch ausgezeichnet, daß die Kammern planospiral in einer Ebene ± symmetrisch aufgerollt sind. Die allmähliche Herausbildung des nautiloiden Typus zeigt der e) Rotalia-Typus, mit den in Schneckenspirale aneinandergereihten Kammern. Erst im Mesozoikum erscheint als besonderer Typus der f) Orbitolites-Typus, dessen Eigentümlichkeit darin besteht, daß die Kammern konzentrische zusammenhängende Ringe bilden.

Eine häufige, aber noch unerklärte Erscheinung bei fossilen Foraminiferen ist der Dimorphismus: Bei sonst gleichem Bau besitzen die einen Formen der gleichen Art eine große, die anderen eine sehr kleine Anfangskammer; besonders häufig zu beobachten bei Miliola, Nummuliten, Fusulinen usw. Biform werden diejenigen Foraminiferen genannt, die wie viele Textularien verschieden gebaute Jugend- und Altersstadien zeigen.

1b) Uebersicht über die fossilen Foraminiferen. Die einfachste und primitivste Form der Schalenbildung ist die,

---

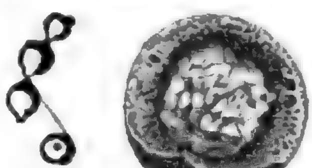
[1]) Daß auch der umgekehrte Vorgang bei Foraminiferen wiederholt stattfand, daß also Formen, deren Bau einem hohen Festigkeitsgrad entsprach, später weniger fest, rückgebildet wurden, ist selbstverständlich. Hier mag beiläufig auf die Analogien hingewiesen werden, die die Cephalopoden in dieser Beziehung bieten (vgl. den Atikel „Cephalopoda").

daß eine amöbenartige Form aus Sandkörnern, die ± fest verkittet werden, ein Gehäuse aufbaut, das entsprechend der unregelmäßigen Gestalt des Weichkörpers unregelmäßige Formen aufweist. Es ist sehr wohl möglich, daß derartig primitive Foraminiferen nicht nur einmal, sondern wiederholt zu verschiedenen geologischen Zeiten entstanden sind. Fossil ist dieser Prototyp der Foraminiferen vertreten durch die Rhabdamminiden.

1. Familie Rhabdamminidae Rhumbler. Einkammerige imperforate Sandschaler von unregelmäßig bis regelmäßig kugeliger Gestalt.

a) Subfamilie Astrorhizinae Brady (pars), ausgezeichnet durch ein unregelmäßig fladenförmiges Gehäuse, aus losen, nicht verkitteten Sandkörnern aufgebaut. Obwohl hierher die primitivsten Foraminiferen gehören, sind sie fossil erst seit dem oberen Jura (Schweiz) mit der Gattung Astrorhiza Sandahl bekannt geworden.

b) Subfamilie Saccammininae Rhumbler. Kammern ± kugelig, zuweilen zu Kolonien vereinigt. Saccammina Sars (Fig. 1) — glattwandige und feinsandige,



A B

Fig. 1. Saccammina Carteri Brady. Kohlenkalk. Elfhills. Northumberland. A. Zu einer Kolonie vereinigte Exemplare. B. Aufgebrochene Schale. Aus Zittel nach Brady.

dicke Schale mit labyrinthischen Hohlräumen — tritt zuerst im Silur auf und reicht bis zur Jetztzeit. Psammophaera Schulze (grobsandig) mit rauher Schalenwand ist seit dem Jura bekannt.

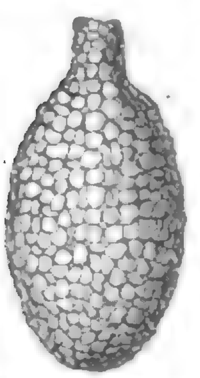


Fig. 2. Reophax difflugiformis Brady. Aus Neumayr.

Reophax (Montf.) Rhumbl. (Fig. 2): Sandige Schale, birnförmige Gestalt. Carbon bis Jetztzeit.

c) Subfamilie Rhizammininae Rhumbler: Fossil unbekannt.

d) Subfamilie Rhabdammininae Rhumbler. Eine größere Festigkeit wird dadurch erreicht, daß das stab- oder sternförmige Gehäuse aus festverkitteten Sandkörnern aufgebaut wird. Die beiden Gattungen Rhabdammina Sars — stabförmig, zuweilen verzweigt — und Hyperammina Brady — stabförmig mit erweitertem Primordialende — sind seit dem Jura bekannt.

2. Familie Nodosinellidae Rhumbler.

Deutlich gekammerte polythalame Sandschaler von gerader perlschnurartiger Gestalt. Die Nodosinellidae schließen unmittelbar an die Rhabdamminidae an. Fossil sind sie seit dem Carbon bekannt.

†[1]) Nodosinella Brady (Fig. 3). Gerade, perlschnurartige, feinsandige Röhren. Carbon. — Von Reophax stammt vermutlich direkt †Nodulina Rhumbler (Jura) ab, die von Nodosinella nur durch grobsandiges Gehäuse unterschieden ist. Haplostiche Reuß ist wie Nodosinella gebaut, hat aber durch Sekundärwände geteilte Kammern. Perm bis Jetztzeit. Eine weitere Gattung Polyphragma Reuß ist fossil seit der Kreide bekannt.

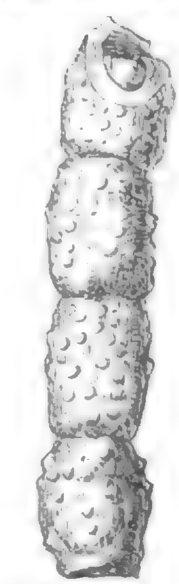


Fig. 3. Nodosinella concinna Brady. Nach Brady.

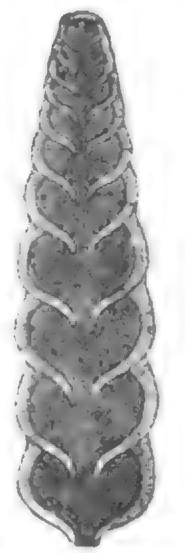


Fig. 4. Nodosaria sp. Schalenquerschnitt. Aus v. Stromer.

3. Familie Nodosaridae Rhumbler.

Nicht aufgerollte, vielkammerige Kalkschaler, deren Schale fein perforiert ist. Mündung terminal. Es ist wohl sicher, daß die Nodosaridae von Nodosinelliden abstammen, obwohl sie geologisch bereits viel früher (seit dem Silur) bekannt sind.

Die langlebige Gattung Nodosaria Lam. (Fig. 4) ist schon im unteren Silur vorhanden und hat durch alle Formationen bis zur Jetztzeit angedauert. Das Gehäuse ist stabförmig, gerade. Die Mündung liegt zentral auf einer vorgezogenen Spitze und besteht aus Radialspalten. Die einzelnen kuge-

[1]) Ein † vor dem Namen bedeutet ausgestorbene Gattung oder Art.

ligen Kammern umfassen einander nur wenig. In der Gestalt entspricht die kalkschalige Nodosaria vollkommen der sandschaligen Nodosinella (isomorphe Formen!). — Einen wesentlichen Fortschritt in der Festigkeit des Gehäuses zeigt Glandulina d'Orb. dadurch, daß die einzelnen Kammern einander vollständig umfassen. Trias bis Jetztzeit. — Lingulina d'Orb. ist eine Glandulina mit querspaltiger Mündung. Carbon(?), Trias bis Jetztzeit. — Frondicularia Defrance. Eine abgeplattete, ± scheibenförmige Nodosaria mit reitenden Kammern und terminaler Mündung. Trias bis Jetztzeit. — Dentalina d'Orb. Wie Nodosaria aber ± stark eingekrümmt. Silur, Carbon bis Jetztzeit. — Marginulina d'Orb. Das ganze Gehäuse gekrümmt, mit kugeligen Kammern, deren Mündungen unmittelbar an der konkaven Seite liegen. Perm bis Jetztzeit. — Vaginulina d'Orb. Wie Marginulina, aber mit abgeplatteten Kammern. Perm bis Jetztzeit.

4. Familie Lageninidae Rhumbler.

Einkammerige, kalkschalige Gehäuse mit ± langem Mündungshalse. Lagena Walk. (Fig. 5) ist nach Rhumbler eine ein-



Fig. 5. Lagena interrupta Will. Eocän. Paris. Nach Terquem. Aus v. Stromer.

kammerig gewordene Nodosaride. Eine Lagena wird bereits aus dem Kambrium angeführt. Dieses Vorkommen scheint zweifelhaft. Sicher seit dem Silur.

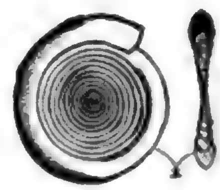
5. Familie Ammodiscidae Rhumbler.

An die ungekammerten Rhabdamminiden schließen sich in ganz natürlicher Weise die Ammodisciden an: Aufgerollte, ungekammerte Sandröhren oder imperforate Kalkröhren. Den Beginn der planospiralen Aufrollung zeigt Lituotuba Rhumbler (Trochammina pars). Nur das Primordialende ist planospiral aufgerollt, an das sich eine ± lange, gerade Sandröhre anschließt. Carbon bis Jetztzeit. Bei Ammodiscus Reuß (+ Hemidiscus Schellw.) ist die ganze ungekammerte Sandröhre planospiral aufgerollt. Seit dem Carbon in allen Formationen. †Psammophys Schellw. ist deshalb von Interesse, weil das in der Jugend ammodiscusartige Gehäuse während der späteren Stadien in unregelmäßigen Windungen aber in der gleichen Ebene weiter wächst. Carbon. Cornuspira Schultze ist wie Ammodiscus aufgerollt und von dieser Gattung nur dadurch unterschieden, daß das Gehäuse aus einer imperforaten Kalkschale gebildet wird. Carbon bis Jetztzeit.

6. Familie Spirinellidae Rhumbler.

Aus der gleichen Wurzel wie die vorhergehende Familie entwickeln sich in vermutlich kambrischer Zeit die Spirinelliden. ± regelmäßig spiral aufgewundene, ungekammerte, aber perforierte Kalkröhren. Durch lokale Verdickungen oder Taschenbildungen im Innern der Kalkröhre entstehen Pseudosepten und damit auch falsche Kammern.

Fig. 6. Cornuspira polygyra. Reuss. Oligocän. Ungarn. Aus Zittel.



Den einfachsten und zugleich regelmäßigsten Typus stellt die Gattung Spirillina Ehrenb. dar. Regelmäßig planospiral aufgewundene Kalkröhren. Bereits aus dem Kambrium sind echte Spirillinaarten bekannt geworden, die sich von den lebenden Vertretern nicht nennenswert unterscheiden. †Archaeodiscus Brady. Gehäuse kugelig. Unsymmetrisch spiral aufgerollte Kalkröhren, die durch lokale Verdickungen der Schale und durch unregelmäßiges Wachstum falsche Kammerung zeigen. In diesen Formen sieht man mit Recht oder Unrecht die Vorfahren der Nummuliten. Carbon. Patellina Will. Kegelförmig aufgewundene, imperforate Kalkröhren. Kreide bis Jetztzeit.

7. Familie Globigerinidae Carpenter.

Eine geringe Zahl von kugeligen Kammern mit grob perforierter Kalkschale sind in unregelmäßiger Spirale aneinander geordnet. Mündung randständig.

Einige Globigerinen, z. B. Globigerina triloba, haben Pulvinulina-artige Anfangskammern. Rhumbler und Schubert sehen darin einen Hinweis auf die Abstammung von Rotaliden. M. E. kann das deshalb schon nicht für alle Globigerinen gelten, weil Globigerinen weit früher erscheinen als die Rotaliden. Vermutlich handelt es sich bei derartigen Globigerinen um rückgebildete Rotaliden, die Konvergenz zu den Globigerinen zeigen.

Globigerina d'Orb. (Fig. 7). Bereits aus dem Präkambrium der Bretagne sind

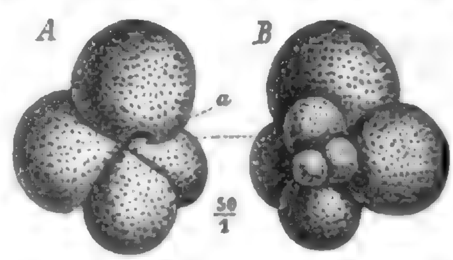


Fig. 7. Globigerina bulloides d'Orb. Miocän. Wien. A. Unterseite. a Mündung. B. Oberseite. Aus Steinmann.

von Cayeux Foraminiferen abgebildet und beschrieben, die eine entfernte Aehnlichkeit mit Globigerinen besitzen. Weitere Funde werden aus dem Kambrium (Amerika) angeführt. Eine größere Verbreitung erlangen die Globigerinen erst im Mesozoikum, dann im Tertiär und in der Jetztzeit, wo sie in weiter Verbreitung planktonisch in wärmeren Meeren leben. Orbulina d'Orb. Innere globigerinaartig aufgerollte Kammern werden von einer Schwimmkammer eingeschlossen. Seit dem Kambrium.

8. Familie Textularidae Schultze. Sie schließen an primitive Sandschaler vom Typus der Nodosinelliden an. Gegenüber der einfachen, perlschnurartigen Aneinanderordnung der Kammern, wie sie den Nodosinelliden eigentümlich ist, zeigen die Textulariden insofern einen Fortschritt zu größerer Festigkeit des Gehäuses, als die meist kugeligen Kammern um eine lange Achse schraubenförmig angeordnet sind. Die Schale ist entweder sandig oder kalkig perforat. Ehrenberg hat aus dem Silur Rußlands Glaukonitsteinkerne abgebildet, die zeigen, daß der Textulariatypus ein uralter ist.

a) Subfamilie Polymorphinae Rhumbler.

Die geblähten Kammern sind von ungleicher Größe und infolgedessen in unregelmäßiger Spirale um eine lange Achse angeordnet. Schale kalkig perforiert.

Polymorphina d'Orb. Unregelmäßig um eine lange Achse aufgerollte Kammern mit terminaler, radialspaltiger Mündung. Zweifelhafte Formen bereits im Silur. Sicher fossil seit der Trias. Bulimina d'Orb. (Fig. 8) ist von Polymorphina in der Haupt-

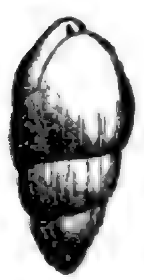


Fig. 8. Bulimina Buchiana d'Orb. Miocän. Nußdorf bei Wien. Aus Zittel.

sache durch die Lage der Mündung unterschieden, die randlich gelegen ist. Devon bis jetzt. Valvulina d'Orb. Die Kammern sind um eine lange Achse so angeordnet, daß das ganze Gehäuse ein kegelförmiges Aussehen erhält. Carbon bis Jetztzeit. Einen Uebergang zu den Textularinae zeigen die beiden folgenden Gattungen: Uvigerina d'Orb. Die Kammern sind triserial in unregelmäßiger Spirale um eine lange Achse angeordnet. Einfache terminale Mündung. Unmittelbar an Uvigerina schließt Sagrina d'Orb. an, mit uvigerinaartigem Primordialende, an das sich ein uniseriales Stadium anschließt. Beide Gattungen Tertiär und lebend.

b) Subfamilie Textularinae Rhumbler.

Ein äußerst interessanter und vielgestaltiger Formenkreis. Die Kammern, kugelig oder abgeplattet, sind um eine lange Achse in regelmäßig drei (triserial) oder zwei Reihen (biserial) angeordnet. Im Laufe der phylogenetischen Entwickelung stellen sich in den verschiedenen Reihen als Endstadien uniseriale Formen ein, zu denen biforme überleiten. Schale sandig oder kalkig perforiert, oder sandig mit kalkiger, wabenartiger Unterlage (vgl. die Fusuliniden, S. 451). Textularinen sind sicher schon im Kambrium vorhanden.

Die paläozoischen Vertreter der Textularinen erhalten dadurch ein eigenes Gepräge, daß die Mündung nicht einfach, sondern siebförmig ist, wie das †Cribrostomum Moeller zeigt. Eine biseriale Textularine mit siebförmiger Mündung aus dem Carbon, Climacamina Brady, ist wohl unmittelbar an die vorhergehende Gattung anzuschließen. Die älteren Kammern sind biserial, die späteren uniserial angeordnet. Weit verbreitet im Carbon. Im Tertiär und der Jetztzeit eine Art. Das uniseriale Endglied dieser Reihe ist Cribrogenerina Schubert. Tertiär. — Eine weitere Reihe beginnt mit Tritaxia Reuß. Regelmäßig triseriale Textularinen mit terminaler Mündung und meist dreiseitigem Querschnitt. Kreide und Jetztzeit. Die biforme Clavulina d'Orb. (Fig. 9, F) — in der Jugend triserial, im Alter uniserial —, die erst vom Tertiär ab bekannt ist, leitet über zu dem uniserialen Endstadium Rhabdogonium Reuß. Tertiär und Jetztzeit. Eine dritte Reihe beginnt mit Verneuilina d'Orb. Triseriale Textularinen mit spaltförmiger Mündung am Innenrande. Kambrium(?), Kreide bis Jetztzeit. Das biforme Glied dieser Reihe ist Gaudryina d'Orb. (Fig. 9, E) — in der Jugend triserial, später biserial. Spaltförmige Oeffnung am Innenrande. — Kreide bis Jetztzeit. Textularia Defrance (Fig. 9, A und C) ist ganz biserial, mit spaltförmiger Mündung am Innenrande. Silur(?), Carbon bis Jetztzeit. Bigenerina d'Orb., in der Jugend biserial, später uniserial. Mündung wie bei Textularia. Tertiär und lebend. Monogenerina d'Orb. ist das einzeilige Endstadium dieser Reihe. — An die Textularinen schließen als Nebenformen an Bolivina d'Orb. (+ Vulvulina und Grammostomum) Fig. 9, B und D, abgeplattete biseriale Textularinen mit terminaler, spaltförmiger Mündung. — Kreide bis Jetztzeit — und Ehrenbergina Reuß. Biserial und platt. Das Primordialende ist

um eine kurze Achse aufgerollt. Tertiär und Jetztzeit.

miliolaartig, die späteren gerade gestreckt. Eozän bis Jetztzeit.

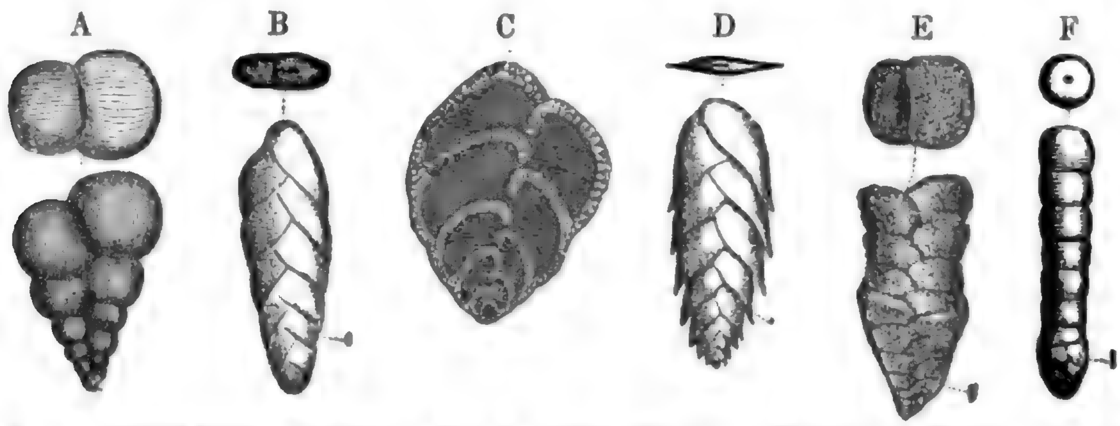


Fig. 9. A. Textularia globifera Reuß. Obere Kreide. Pattenauer Stollen bei Traunstein. B. Bolivina incrassata Reuß. Obere Kreide. Götzreuther Graben bei Siegsdorf. C. Längsschnitt durch eine Textularide. D. Bolivina gibbum d'Orb. Pliocän. Siena. E. Gaudryina rugosa d'Orb. Obere Kreide. Götzreuther Graben. F. Clavulina communis d'Orb. Miocän. Baden bei Wien. Aus Zittel.



Fig. 10. A. Biloculina inornata d'Orb. Miocän. Baden bei Wien. B. Triloculina gibba d'Orb. Oligocän. Astrupp. C. Spiroloculina Badensii d'Orb. Miocän. Baden bei Wien. D. Quinqueloculina saxorum d'Orb. Eocän. Grignon bei Paris.

9. Familie Miliolinidae Carpenter (Fig. 10).

Schale sandig oder kalkig und dann imperforat. Die langen und gestreckten Kammern sind um eine lange Achse so aufgerollt, daß ein Umgang nur zwei Kammern umfaßt. Mündung terminal.

Der älteste Vertreter ist †Agathammina Neumayr: Ein Sandschaler, bei dem die miliolaartige Aufrollung schon ganz deutlich hervortritt. Perm und Carbon.

Die Miliolniden selbst sind, abgesehen davon, daß ihre Schale kalkig imperforat ist, dadurch ausgezeichnet, daß die Kammern um eine lange Achse so aufgerollt sind, daß immer zwei Kammern einen Umgang ausmachen. Nach der Ausbildung der Mündung und nach der Art der Aufrollung werden verschiedene Gattungen und Untergattungen unterschieden. Miliola Lam. hat eine einfache, durch einen zahnartigen Fortsatz geteilte Mündung und sich seitlich berührende Kammern. Bei dem Subgenus Biloculina d'Orb. liegen alle Kammern in einer Ebene und berühren sich seitlich — seit der Trias —, bei Triloculina d'Orb. in drei — seit dem Jura —, bei Quinqueloculina d'Orb. in fünf Ebenen — seit der Kreide. Bei Vertebralina d'Orb. sind die Jugendkammern

Diesen Untergattungen entsprechen Parallelformen, bei denen die Mündung siebförmig ist und die Kammern durch eine Basalplatte gestützt werden: Idalina Mun. Chalm. (= Biloculina), Trillina Mun. Chalm. (= Triloculina), Pentellina Mun. Chalm. (= Quinqueloculina). Bei Fabularia Defr. sind die Kammern außerdem durch Pfeiler und Sekundärwände gestützt. Tertiär.

In ihren gegenseitigen genetischen Beziehungen noch nicht sicher gedeutet sind: Nubecularia Defr. Gestreckte, lagenaartige Kammern, die wie bei Nodosarien aneinander gereiht sind. Trias bis Jetztzeit. Spiroloculina d'Orb. ist eine Biloculina, deren Kammern sich seitlich nicht berühren. Seit der Juraformation. Ophthalmidium K. u. Z. Kammern wie bei Nubecularia. Das Primordialende Corunspira-artig, die folgenden Kammern Spiroloculina-artig aufgerollt, während die Kammern im Alter in gerader Richtung weiterwachsen. Jura bis Jetztzeit.

10. Familie Cristellariidae.

Schale kalkig perforiert. Die Kammern sind planospiral, ± vollständig (Nautiloid) um eine kurze Achse aufgerollt. Die einfache Mündung liegt an der Außenseite. Die Cri-

stellariiden stammen vermutlich von den Nodosariden ab. Die ältesten hierhergehörigen Formen erscheinen in der Trias mit der Gattung Cristellaria Lam. (Fig. 11). Be-

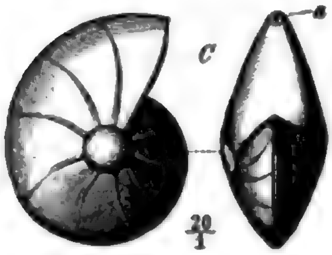


Fig. 11. Cristellaria rotulata Lmk. Gault. Braunschweig. Aus Steinmann.

ginnende oder vollendete nautiloide Aufrollung. Die radialspaltige Mündung liegt am Außenrande. Trias bis Jetztzeit. Robulina d'Orb. Aufrollung vollständig. Mündung dreieckig. Tertiär und lebend. Flabellina d'Orb. flach, nur das Primordialende nautiloid aufgerollt. Tertiär.

11. Familie Endothyridae Rhumbler.

Hierher gehören Formen, die überleiten von den Nodosinelliden zu den Fusuliniden. Die meist noch sandigen und fast immer kugeligen Kammern sind nach dem Nautiloidtypus aufgerollt, aber immer ein wenig asymmetrisch. Die Mündung ist einfach und randlich oder terminal.

Haplophragmium Reuß. Aufgewachsen. Grobsandige, saccamminaartige Kammern, die um eine kurze Achse in unregelmäßiger Spirale aufgerollt sind, mit zunehmendem Alter aber in gerader Richtung weiter wachsen, Septen einfach. Die aufgewachsenen Haplophragmium-Arten werden als Placopsilina d'Orb bezeichnet. Sie sind seit dem Silur bekannt. †Endothyra Phill. (Fig. 12). Das Gehäuse besteht aus

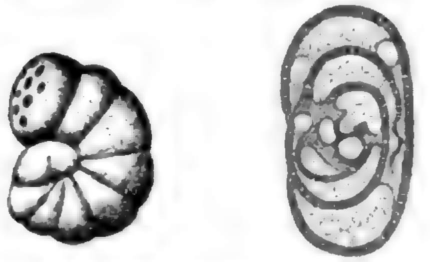


Fig. 12. Endohyra parva Moeller. Kohlenkalk. Rußland. Aus Zittel.

zahlreichen kleineren Kammern, die nahezu bilateral symmetrisch aufgerollt sind. Schale kalkig sandig. Mündung am Innenrande. Das Septum grobporös. Carbon. †Bradyina Moeller ist endothyraähnlich. Auf der jeweiligen Schlußwand mit einer Reihe im Halbkreis angeordneter Poren. Schale kalkig. Carbon.

Hierher gehören vermutlich auch noch Stacheia Brady, eine aufgewachsene und daher unregelmäßige Form mit Sekundärsepten — Carbon bis Jetztzeit — und Trochammina Park. Jones, deren noch agglutinierende Schale eine glatte glänzende Oberfläche zeigt. Aufrollung wie bei Haplophragmium. Jura bis Jetztzeit.

Unmittelbar von den Endothyriden stammt ab die

12. Familie †Fusulinidae Moeller.

Nahezu symmetrisch aufgerollt. Gehäuse kalkig. Es wird durch die parallel zur Aufrollungsachse laufenden Septen in zahlreiche, äußerlich nur wenig hervortretende Kammern geteilt. Die Wand besteht nur aus einem dichten, d. h. nicht porösen, Dachblatt oder aus diesem und einem darunter liegenden Wabenwerk. Die Septen sind gefältelt und am Unterrande dieser gefältelten Septen liegen zahlreiche kleinere Oeffnungen; in der Sagittalebene außerdem noch eine größere.

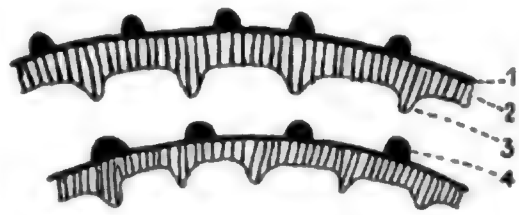


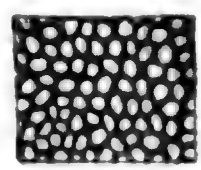
Fig. 13. Strukturelemente der Fusuliniden. Axialschnitt. 1. Dachblatt, 2 Wabenwerk, 3 Dachskelett, 4 Basalskelett. Nach v. Staff.

Bis vor kurzem galt die Schale des Fusulinen als porös. Erst neuere Untersuchungen (H. v. Staff) haben die Unhaltbarkeit dieser Auffassung gezeigt. Es sind bei den Fusuliniden nach v. Staff folgende Strukturelemente zu unterscheiden:

1. Das sehr dünne, außen, also peripher gelegene, undurchbohrte Dachblatt. Eine Abbiegung des Dachblattes bilden die Septen.

2. Unter dem Dachblatt liegt eine Kalkschicht, die von sehr feinen, aber dichtstehenden Röhren durchbohrt ist. Die Röhren stehen senkrecht zum Dachblatt und setzen nicht durch dieses hindurch. Diese Schalenlage hat somit große Aehnlichkeit mit einem „Wabenwerk". Fig. 13 stellt ein derartiges Wabenwerk im Tangential-, Fig. 14 im Axialschnitt dar.

Fig. 14. Schwagerina princeps. Ehrenb. Tangentialschliff. Aus Stromer.



3. Bei einzelnen Gattungen ist das Wabenwerk nach unten verlängert in axiale und sagittale Streifen, die somit Gitterstruktur zeigen. Es ist das „Dachskelett."

4. Auf dem Dachblatt selbst können um das

ganze Gehäuse herum sagittale Reifen laufen: „Basalreifen". Bei allen Fusuliniden sind deren mindestens 2 vorhanden, die die in der Medianebene gelegene Mundöffnung begrenzen.

Alle diese Skulpturelemente zusammen zeigt Neoschwagerina Yabe.

Subfamilie †Fusulinellinae v. Staff-Wedekind. Anfangswindungen asymmetrisch aufgerollt. Die Schalenwand besteht nur aus Dachblatt. Die beiden Gattungen †Fusulinella Moeller und †Schubertella Staff-Wedekind — bei der ersten ist die Aufrollungsachse der kürzeste, bei der letzteren der längste Durchmesser — reichen vom Untercarbon bis zum Perm hinauf.

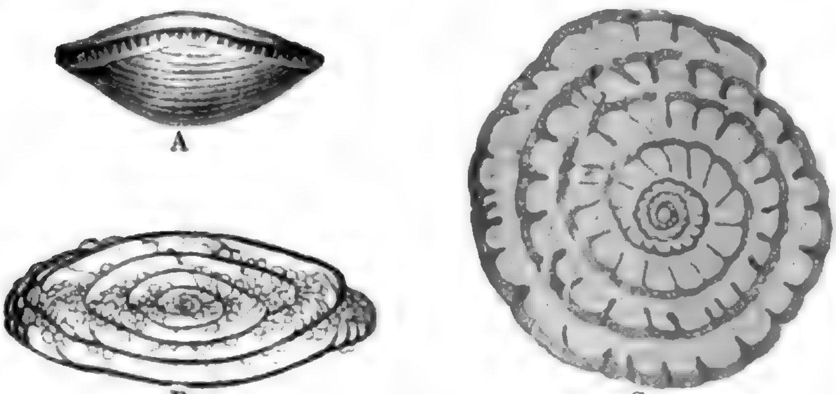


Fig. 15. Fusulina fusulinoides Schellw. Oberkarbon, Karnische Alpen. A. Ansicht von vorn. Gefälteltes Septum! B. Axialschliff. C. Sagittalschliff. Aus v. Stromer.

Subfamilie †Fusulinae v. Staff-Wedekind. Diese Gruppe zeigt insofern einen Fortschritt, als auch die Anfangskammern symmetrisch aufgerollt sind und neben dem Dachblatt ein Wabenwerk fast immer vorhanden ist. Obercarbon bis Perm. Girtyina v. Staff. Die Wand besteht nur aus porenlosem Dachblatt. Fusulina Fischer-Waldheim (Fig. 15). Außer dem Dachblatt ist immer ein Wabenwerk vorhanden. Die Septen zeigen zuweilen echte Poren. Das Subgenus †Schellwienia v. Staff-Wedekind hat die Aufrollungsachse als längsten Durchmesser und daher ein spindelförmiges Gehäuse, während das Subgenus Schwagerina Moeller im Alter die Aufrollungsachse so verkürzt, daß das Gehäuse kugelig wird.

Subfamilie Verbeekinae v. Staff-Wedekind. Außer dem Dachblatt und dem Wabenwerk ist meist noch ein Dachskelett vorhanden. Die Anfangsumgänge sind kugelig, aber meist asymmetrisch aufgerollt. †Verbeekina v. Staff — eine kugelige Form ohne Basalskelett — und †Doliolina Schellwien — ein tonnenförmiger Typus mit wohlentwickeltem Basalskelett — sind auf das untere Perm beschränkt. †Neoschwagerina Yabe — ebenfalls ein tonnenförmiger Typus mit Dach- und Basalskelett — ist auf das Perm beschränkt.

13. Familie Rotalidae Carpenter. Außer den Fusuniliden wurzeln in den Endothyriden wahrscheinlich auch die Rotaliden. Die Kammern sind asymmetrisch in Form eines flachen Kegels so aufgerollt, daß alle Kammern nur auf der einen Seite sichtbar sind. Die eine Seite ist ± flach, die andere Seite (Oberseite) gewölbt. Mündung an der Innenseite. Schale kalkig und perforiert.

Discorbina Park. Jones. Die Kammern sind in Form eines ± hohen Kegels aufgerollt; Oberseite konvex, Unterseite flach. Kreide bis Jetztzeit. Planorbulina Park. Jones. Die großen, gewölbten und grobporösen Kammern sind zu einer flachen Scheibe unregelmäßig spiral aufgerollt. Lias bis Jetztzeit. Rotalia Lam. Fein perforierte Kalkschale. Die Kammern sind fast scheibenförmig um eine kurze Achse aufgerollt. Sie greifen auf der konvexen Seite bis zum Nabel über. Die Septen bestehen aus zwei Blättern. Mündung auf der konvexen Seite. Kambrium (?), Silur (?), Jura bis Jetztzeit. Pulvinulina Park. Jones. Rotaliaähnliche Form mit einfachen Septen. Carbon bis Jetztzeit. Calcarina d'Orb. Wie Rotalia, aber mit Radialdornen. Karbon bis Jetztzeit. Truncatulina d'Orb. (Fig. 16). Gehäuse frei oder aufgewachsen,

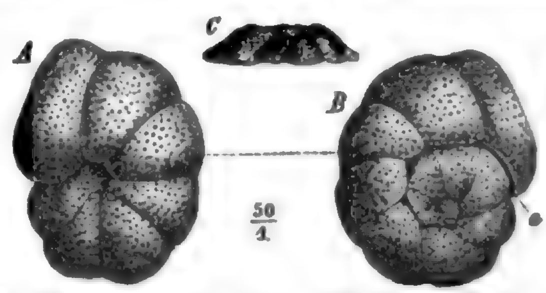


Fig. 16. Truncatulina lobatula Walk. sp. Miocän. Wien. Aus Steinmann.

grobporös. Auf der flachen Unterseite — hier auch die Mundöffnung — sind alle Kammern sichtbar. Tertiär und lebend.

14. Familie Nummulitinidae Carpent.

Die Nummulitiniden stammen wahrscheinlich von Rotaliden ab, zu denen sie vielfache zeitliche und morphologische Be-

ziehungen zeigen. Andererseits sucht man sie direkt an die Ammodisciden (Archaeodiscus) anzuschließen. Von Interesse ist auch Nummuloculina Steinm., eine Nummulitinide mit miliolaartigen Jugendwindungen.

Die kalkigen, äußerlich nicht hervortreten, Kammern sind symmetrisch planospiral oder doch nahezu symmetrisch aufgerollt. Die Mündung liegt meist an der Innenseite. Sie ist entweder einfach oder besteht aus einer größeren Anzahl kleinerer Oeffnungen —ähnlich wie bei den Fusuliniden. Schale kalkig. Oberhalb des Dachblattes liegt bei den höher entwickelten Formen eine Faserschicht. Während bei den Fusuliniden spindelförmige bis kugelförmige Gestalten vorherrschen, bei denen die Aufrollungsachse der längste Durchmesser ist, sind die Nummulitiniden extrem scheibenförmige Gestalten, bei denen die Aufrollungsachse der kürzeste Durchmesser ist.

Amphistegina d'Orb. Die Kammern sind um eine kurze Achse planospiral aufgerollt. Die Windungen umfassen auf der einen Seite die vorhergehenden vollständig, auf der anderen unvollständig. Kreide bis Jetztzeit. Nonionina d'Orb. Planospiral aufgerollte Kammern. - Der letzte Umgang umhüllt die vorhergehenden vollständig. Die spaltförmige Mundöffnung liegt am Innenrande. Kreide bis Jetztzeit. Polystomella d'Orb. Wie Nonionina, aber mit zahlreichen, am Außenrande des Septums gelegenen Oeffnungen. Tertiär bis Jetztzeit. Operculina d'Orb. Gehäuse flach scheibenförmig, bilateral symmetrisch. Die Umgänge umfassen einander nicht. Nonioninaartige Mündung. Kreide bis Jetztzeit. Heterostegina d'Orb. Wie Amphistegina, aber mit Sekundärsepten. Tertiär und lebend. Nummulites d'Orb. (Fig. 17). . Das ganze Gehäuse ist scheiben-

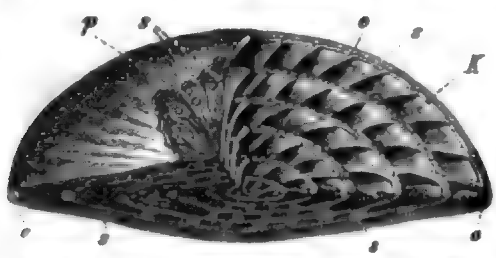


Fig. 17. Nummulites sp. Schema. K Kammerlage der Sagittalebene. S Septa. Ueber dem Septalblatt, der Fortsetzung der Septen, die Faserschicht c. p Pfeiler. Aus Steinmann.

förmig. Die Kammern sind um eine kurze Achse bilateral symmetrisch aufgerollt. Die einzelnen Windungen umfassen die vorhergehenden vollständig. Das Septalblatt besteht aus zwei Blättern. Ein kompliziertes Kanalsystem — wie in den meisten Lehrbüchern angegeben wird — ist nicht vorhanden! Die Septen sind entweder einfach (Radiatae) oder vielfach gewunden (Sinuatae) oder auch mannigfach verästelt (Reticulatae). Dazu kann noch ein kompliziertes Stützskelett, meist aus Pfeilern bestehend, kommen. Die Mündung besteht aus einer in der Medianebene gelegenen größeren Oeffnung und aus zahlreichen jederseits derselben gelegenen kleineren Oeffnungen. Seit der Juraformation.

15. Familie Orbitolitidae Rhumbler.

Eine Reihe höher entwickelter Foraminiferen haben den gemeinsamen Charakter, daß die einzelnen Kammern zusammenhängende Ringe bilden, die dadurch entstehen, daß die späteren Kammern zahlreiche Oeffnungen auf der schmalen peripheren Außenseite haben. Die Orbitolitidae bilden keine genetisch einheitliche Gruppe, sondern sind allem Anschein nach die Endglieder verschiedener Reihen. Die Herausbildung dieses Typus zeigt Peneroplis Montf. (Fig. 18) mit



Fig. 18. Peneroplis pertusus Forskal. Rezent. Rotes Meer. Aus v. Stromer.

flach scheibenförmigem Gehäuse. Die Kammern sind unvollständig um eine kurze Achse aufgerollt. Zahlreiche Mündungen liegen auf der Außenseite. Die späteren Kammern verbreitern sich stark, so daß die Anbahnung des zyklischen Wachstums deutlich hervortritt. Seit dem Tertiär. Orbiculina Lam. Die Primordialkammern peneroplisartig, die äußeren streng zyklisch angeordnet. Tertiär und lebend. Orbitolites Lam. (Fig. 19).



Fig. 19. Orbitolites complanata Lam. Eocän. Paris. Aus Zittel.

Flache bikonkave Scheiben. Schale imperforat. Die abgeplattete Zentralkammer mit einer Oeffnung, die zweite und die folgenden Kammern mit zwei und mehr Oeffnungen, die auf der schmalen Außenseite liegen. Die späteren Umgänge legen sich als vollständig geschlossene Ringe um die alten

herum. Die einzelnen Ringe sind durch Radialsepten untergekammert. Kreide, Tertiär und lebend.

Orbitoides d'Orb. Gehäuse scheibenförmig aus zahlreichen zyklischen Ringen aufgebaut, die sich um ein spiral eingerolltes Primordialende herumlegen. Durch Längs- und Querwände werden die Ringe in eine große Zahl kleinerer Kammern von meist vierseitigem Querschnitt geteilt, deren Wände von Poren durchbohrt werden. Kreide und Tertiär. †Orbitolina Lam. Flach schüsselförmig mit zyklisch angeordneten Kammern. Schale kalkig oder sandig. Die einzelnen Kammern durch zahlreiche Scheidewände mehrfach geteilt. Vielleicht nur eine asymmetrische Orbitolites (Douvillé). Maximum der Häufigkeit in der Kreide.

Hier mag vorläufig auch noch Alveolina (Bosc.) angeschlossen werden, über deren genauere systematische Stellung nicht eher Definitives gesagt werden kann, bis Spezialuntersuchungen ausgeführt sind.

1c) Geologische Bedeutung der fossilen Foraminiferen. Die fossilen Foraminiferen sind nicht als Leitfossilien, sondern als Gesteinsbildner von großer Bedeutung. Aus dem älteren Paläozoikum — dem Kambrium, Silur und Devon — liegen durchweg nur spärliche und schlecht erhaltene Foraminiferenreste vor, so daß zurzeit auch nicht annäherungsweise festzustellen ist, was an Foraminiferengattungen bereits an der Unterkante des Kambriums vorhanden ist. Nur in den untersilurischen Glaukonitsanden von Petersburg sind Foraminiferenreste etwas häufiger — Rotaliden, Textulariden, Nodosariden, Lageniden und Globigerinen.

Im weiteren Laufe der Erdgeschichte gelangen die Foraminiferen zweimal zu größerer geologischer Bedeutung: einmal im Anschluß an die große carbonische Gebirgsfaltung, das zweitemal im Anschluß an die gewaltige tertiäre Gebirgsfaltung. Beide Male handelt es sich um ungewöhnlich große, hochentwickelte, streng bilateral symmetrische Formen (nautiloider Typus) von kurzer Lebensdauer, aber weltweiter Verbreitung. Zunächst erscheint im Obercarbon und Perm das Geschlecht der Fusuliniden mit den Gattungen Fusulina und Schwagerina in so großer Häufigkeit, daß man geradezu von Fusulinen- und Schwagerinenkalken spricht. Wenn die Annahme berechtigt ist, daß Fusuliniden ein tropisches oder doch sehr warmes Klima anzeigen, so würde das bedeuten, daß auf der Nordhemisphäre bis 80° n. Br. im jüngeren Paläozoikum ein zum mindesten warmes Klima geherrscht hat. Das Fusulinenmeer hatte auch, wie Kokens Karte (Neues Jahrbuch für Mineralogie, Festband) zeigt, auf der Südhemisphäre eine große Ausdehnung.

In der Trias- und Juraformation treten die Foraminiferen wieder in auffallender Weise zurück, wenn auch für manche Kalkmassen (Alpen) anzunehmen ist, daß bei ihrer Entstehung kleinere Foraminiferen eine wichtige Rolle gespielt haben (Rotaliden, Globigeriniden, Textulariden usw.). In der Kreide setzt wiederum ein allmähliches Aufblühen ein, gekennzeichnet durch das neuerliche Erscheinen größerer Formen (Orbitolites). Die weiße Schreibkreide und manche Grünsande bestehen fast ganz aus Textulariden, Milioliden und Rotaliden. Erst im Alttertiär erreichen zum zweiten Male große Formen eine ungemeine Bedeutung. Die oft talergroßen Nummuliten, daneben Orbitoides, Alveolina und Miliola treten als Gesteinsbildner in den wärmeren Mediterrangebieten hervor — „Nummulitenmeer" (die Thetys von Sueß). Im Jungtertiär ist das auffällige Zurücktreten der Nummuliten bemerkenswert. Echter Foraminiferenschlick, wie er sich in heutigen Meeren bildet, ist nur aus jüngerem Tertiär bekannt (Bismarckarchipel, Salomonsinseln usw.).

2. Radiolaria. Uebersicht. Geologische Bedeutung. Die Protoplasmamasse der Radiolarien wird durch eine häutige Membran in einen äußeren peripheren und einen inneren Teil (Zentralkapsel) zerlegt. Haeckel unterscheidet vier Ordnungen:

1. Acantharia: Skelette aus Strontiumsulfat bestehend.

2. Spumellaria (Fig. 20):

Das kieselige Gitterskelett ist kugelig bis scheibenförmig.

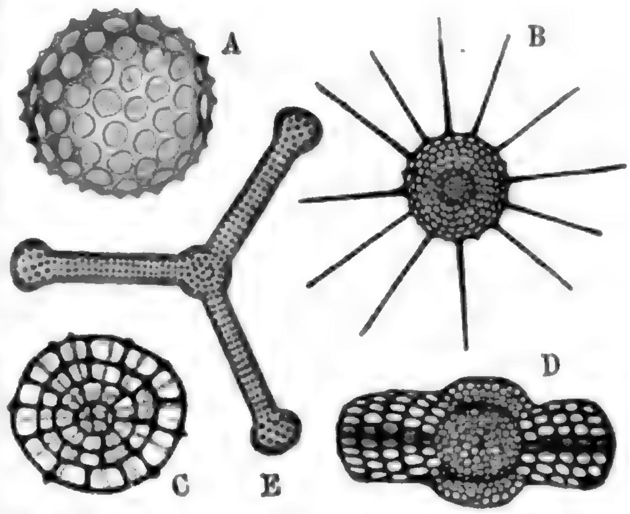


Fig. 20. Spumellaria. A. Cenosphaera macropora Rüst. B. Heliodiscus acucinctus Rüst. Untersilur, Cabrières. C. Cenodiscus intermedius Rüst. Untercarbon, Harz. D. Amphymenium Krautii Rüst. Oberdevon Harz. E. Dictyastrum neocomense Rüst. Neocom, Gadenazza, Alpen. Aus Stromer. Nach Rüst.

3. Nassellaria (Fig. 21):
Das kieselige Gitterskelett ist mützenförmig.

A B C

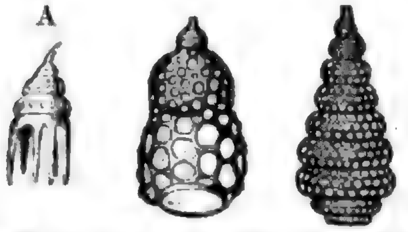


Fig. 31. Nassellaria. A. Encystidium sphaerophilum Ehrenb. Miocän. Barbados. B. Lithocampe Tschernytschewii Rüst. Unterdevon. Südural. C. Clatrocyclas tintinabulum Vinassa. Jura. Italien. Aus Stromer. Nach Rüst, Vinassa u. a.

4. Phaeodaria: Das Gitterskelett, aus hohlen Kieselstacheln aufgebaut, ist von verschiedener Gestalt. Nur die Spumellaria, Nasselaria und Phaeodaria sind fossil bekannt.

Die Radiolarien, durch einen ungemeinen Formenreichtum ausgezeichnet, gehören zu den ältesten Fossilien. Bereits aus dem Präkambrium der Bretagne werden von Barrois und Cayeux Radiolarien, sowohl Spumellaria wie Nasselaria, erwähnt. In allen späteren Formationen treten sie stellenweise mit als Gesteinsbildner in kieseligen Gesteinen hervor. Sie finden sich namentlich in Kieselschiefern, Wetzschiefern, Jaspis, Hornsteinen usw. Die kambrischen Vorkommen sind noch sehr spärlich (kambrische Griffelschiefer von Sonnenburg in Thüringen), während Radiolarienführende Kieselschiefer des Untersilur (Schottland, Sachsen, Cabrières in Frankreich) verbreiteter sind. Das gleiche gilt von den Kieselschiefern der devonischen und carbonischen Formation.

In der Trias (bisher nur in der alpinen) und im Jura (z. B. Lias von Hannover, Aptychenkalk der Alpen usw.) sind sie nur stellenweise häufig. Wegen der vorzüglichen Erhaltung der Radiolarien sind zwei Vorkommen der oberen Kreide, das von Vordorf in Braunschweig und von Haldem in Westfalen, erwähnenswert.

Dem Tertiär gehören die berühmten Radiolarien- und Foraminiferenvorkommen auf Sizilien an.

Reiner Radiolarienschlamm bildet sich in den heutigen Ozeanen nur in sehr großen Tiefen zwischen 4000 und 8000 m. Deshalb wird namentlich von Steinmann für viele Radiolariengesteine (Radiolarite) ebenfalls eine Entstehung in sehr großen Tiefen in Anspruch genommen.

Literatur. *Vgl. für Foraminiferen und Radiolarien die Zusammenstellungen in* **K. A. v. Zittel,** *Grundzüge der Paläontologie, 1. Abt. Invertebrata, 3. Aufl. 1910. — Für Foraminiferen allein auch* **K. Beutler,** *Paläontologisch-stratigraphische und zoologisch-systematische Literatur über marine Foraminiferen. München 1911.*

R. Wedekind.

Richer
Jean.

Gestorben 1696 in Paris, Mitglied der Pariser Akademie. Er ging im Auftrag derselben von 1671 bis 1673 nach Cayenne, um die Sonnenparallaxe zu bestimmen. Dort beobachtete er die Veränderlichkeit der Länge des Sekundenpendels mit der geographischen Breite.

E. Drude.

Richter
Jeremias Benjamin.

Geboren am 10. März 1762 in Hirschberg (Schlesien), gestorben am 4. April 1807 in Berlin, war zuerst Bergsekretär in Breslau, dann in Berlin Bergassessor und zugleich „Arkanist" an der kgl. preußischen Porzellanmanufaktur. Richter ist Begründer der „Stöchiometrie" oder „Meßkunst chemischer Elemente", einer Disziplin, die er auf Grund eigener Versuche in einem lange unbeachtet gebliebenen Werke (1792 bis 1794) behandelte. Durch zahlreiche, für jene Zeit ziemlich genaue Analysen von Salzen, die aus bestimmten Mengen je einer Base und je einer Säure gebildet werden, stellte er die Konstanz der Verbindungsverhältnisse fest und erkannte für die neutralen Salze das wichtige Neutralitätsgesetz. Er wurde so zum Vorgänger Daltons, des Begründers der chemischen Atomtheorie (vgl. die Biographie von Dalton). In seinem periodisch erschienenen Werke (1792 bis 1802) „Ueber die neueren Gegenstände der Chemie" sind seine mühsamen Forschungen niedergelegt, aber in so schwerfälliger, durch die phlogistische Auffassung schwierig verständlicher Sprache, daß seine Verdienste erst nach seinem Tode gewürdigt worden sind. Die Gelegenheitsschrift von Löwig „Jeremias Benjamin Richter, der Entdecker der chemischen Proportionen" (Breslau 1874) gibt über Richters Leben und Wirken den besten Aufschluß.

E. von Meyer.

von Richthofen
Ferdinand.

Er wurde zu Karlsruhe in Schlesien am 5. Mai 1833 geboren. In Breslau und Berlin widmete er sich naturwissenschaftlichen Studien, machte 1856 geognostische Aufnahmen im südöstlichen Tirol und war bis 1860 an der geologischen Landesanstalt in Wien tätig. In diesem Jahre begleitete er als Geologe die preußische Expedition

nach Ostasien. Bis zum Jahre 1872, in dem er wieder nach Europa zurückkehrte, dehnten sich seine berühmten Weltreisen aus. Japan, China, Siam, Manila, die holländischen Besitzungen in Hinterindien, weiter Kalifornien und die Sierra Nevada wurden von ihm bereist. 1868 besuchte er von Schanghai aus wiederum fast ganz China und Teile von Japan. Nach seiner Rückkehr nach Europa bearbeitete er die vielfach bahnbrechenden Ergebnisse seiner Weltreise. 1875 erhielt er einen Ruf als Professor der Geographie nach Bonn; aber erst nach Vollendung des ersten Teils seines Reisewerks trat er 1879 die Professur an. 1883 ging er als Professor der Erdkunde nach Leipzig; 1886 leistete er einem Ruf nach Berlin Folge, wo er 1887 das Geographische Institut und 1901 bis 1905 das Institut für Meereskunde einrichtete. Lange Zeit war er Vorsitzender der Berliner Gesellschaft für Erdkunde. Er starb am 6. Oktober 1905 in Berlin.

Von großer Bedeutung sind seine geologischen Untersuchungen in China besonders über die Steinkohlenvorkommen, vor allem aber über den asiatischen Löß. v. Richthofen war der erste Forscher, der den dortigen Löß als ein Produkt von äolischer Bildung ansprach und später diese Ansicht von der Entstehung des Lößes auch auf die europäischen und sonstigen Lößvorkommen übertragen hat. Die Nummulitengesteine auf den Philippinen, die Goldlager Kaliforniens, die trachytischen Gesteine der Rocky Mountains und der Sierra Nevada waren der Gegenstand seiner Forschungen. Von seinen zahlreichen Werken mag hier als besonders wichtig erwähnt werden: „China, Ergebnisse eigener Reisen und darauf gegründeter Studien" (Berlin 1877 bis 1883, Atlas dazu 1885); ferner „Aufgaben und Methoden der heutigen Geographie" (Leipzig 1883) und der „Führer für Forschungsreisende" (Berlin 1886), der für die methodische Behandlung der Oberflächenbetrachtung maßgebend wurde.

Literatur. ***F. Lampe,*** *Freiherr v. Richthofen, Umschau* **7**, *375 bis 377, 1903; Naturw. Wochenschrift* **18**, *361 bis 370, 1903.* — ***C. Voigt,*** *Ferd. Frh. v. Richthofen, Nekrolog, München, Sitz. Ber. d. Akad. d. Wiss. math. phys. Kl.* **36**, *472 bis 477, 1906.* — ***S. Passarge,*** *Ferd. v. Richthofen, Jahresb. d. schles. Ges. f. vaterl. Kultur in Breslau* **83** *(I).* — ***v. Drygalski,*** *Ferd. Frh. v. Richthofen. Mit einem Anhang von E. Tiessen: die Schriften Ferd. Frh. v. Richthofens, Leipzig 1906.* — ***Hettner,*** *Ferd. v. Richthofens Bedeutung für die Geographie, Geogr. Zeitschr., Januar 1906.*

O. Marschall.

Richtungen.

Fundamentale Richtungen.

1. Messungen im Raum. Koordinatensysteme. 2. Systematische Uebersicht und Definitionen: a) Lotrichtung. b) Horizontalebene. c) Horizontale Linien. d) Meridianrichtung. 3. Instrumente: a) Lot und Setzwage. b) Dosenlibelle. c) Röhrenlibelle. d) Kanalwage. e) Quecksilberhorizont. f) Gyroskopkollimator. g) Kreiselkompaß. 4. Anwendung der Instrumente: a) Vertikalstellung von Prismen und Zylindern. b) Vertikalstellung der optischen Achse eines Visierfernrohrs. c) Horizontierung einer Ebene. d) Horizontierung eines Zylinders. e) Horizontierung einer optischen Achse. f) Bestimmung der astronomischen Meridianrichtung.

1. Messungen im Raum. Koordinatensysteme. Zur Ausführung von Messungen im Raume bedarf man als Grundlage eines Koordinatensystems, das je nach dem verfolgten Zweck verschieden gewählt werden kann. In der Astronomie z. B. wird zum Anfangspunkt des Koordinatensystems entweder der Schwerpunkt des Sonnensystems, oder das Zentrum der Sonne oder eines Planeten, oder auch ein Punkt eines Beobachtungsinstruments, meist der Schnittpunkt zweier Achsen, gewählt, und ebenso verschiedenartig ist die Wahl der Richtungen der Koordinatenachsen.

2. Systematische Uebersicht und Definitionen. Bei den meisten Messungen spielt die Schwerkraft eine so bedeutsame Rolle, daß sie für die Wahl des Koordinatensystems ausschlaggebend ist. Viel seltener kommt die Richtung der erdmagnetischen Kraft in Frage; daher genügt hier ein Hinweis auf den Artikel „Magnetfeld der Erde".

2a) Lotrichtung. Die Kraftlinien des Potentials der Schwerkraft sind zwar genau genommen doppelt gekrümmte Kurven, und da die Schwerkraft die Resultante nicht nur aus der Gravitationswirkung der Erde und der durch die Erdrotation bewirkten Zentrifugalkraft ist, sondern auch von der Attraktion anderer Himmelskörper, insbesondere des Mondes und der Sonne abhängt, so ist die Lotrichtung an einem Punkte streng zu definieren als Tangente an die durch den Punkt gehende Kraftlinie der Schwerkraft; die Krümmung dieser Kraftlinien ist aber so gering, daß es erst in jüngster Zeit gelungen ist, sie auch experimentell nachzuweisen (1).[1] Auch die Schwankungen der Lotrichtung infolge der Anziehung des Mondes und der Sonne sind erst in den letzten Jahren der Messung zugänglich geworden (2).

2b) Horizontalebene. Die Niveauflächen der Schwerkraft sind krumme Flächen, deren Krümmungsradien sehr groß, von der Ordnung des Erdradius sind, so daß die als Tangentialebene an diese Niveaufläche zu definierende Horizontalebene in der näheren Umgebung eines Beobachtungsortes praktisch als zusammenfallend mit der Niveaufläche betrachtet werden kann. Die Unterschiede der Krümmungsradien der Niveaufläche an einem Punkt sind von derselben Größenordnung wie die Krümmung der Kraftlinien der Schwere; durchschnittlich

[1]) Die eingeklammerten Zahlen beziehen sich auf die Literatur am Schluß.

ist der Krümmungsradius des Meridianschnittes am kleinsten, besonders in kleinen geographischen Breiten; jedoch sind Abweichungen nachweisbar, die davon herrühren, daß die Erde kein genaues Rotationsellipsoid ist.

2c) Horizontale Linien. Eine in der Horizontalebene eines Ortes verlaufende gerade Linie ist daher in größerer Entfernung vom Ausgangspunkt nicht mehr streng horizontal; um abzuschätzen, wann man diesen Umstand bei Messungen zu berücksichtigen hat, beachte man, daß die Tangente des Winkels, den die horizontale Gerade eines Ortes mit der Horizontalebene eines zweiten Ortes bildet, in erster Näherung gleich ist der Entfernung beider Orte dividiert durch den Erdradius. Bei größeren Entfernungen und hohen Genauigkeitsansprüchen, wie z. B. bei Präzisionsnivellements, darf die Erde nicht mehr als Kugel betrachtet werden, sondern es ist auf ihre Abplattung Rücksicht zu nehmen (3); streng genommen müßte, da das Rotationsellipsoid erst eine zweite Näherungsfigur darstellt, auf die Gestalt des Geoids, der tatsächlichen Niveaufläche, Bezug genommen werden, und ebenso auf die Krümmung der Visierlinie infolge der optischen Inhomogenität der Atmosphäre (terrestrische Refraktion [4]).

2d) Meridianrichtung. Unter allen horizontalen Linien ist eine astronomisch besonders ausgezeichnet: die Meridianrichtung; sie ist die Schnittlinie einer durch die Rotationsachse der Erde und den Beobachtungsort gelegten Ebene mit der Horizontalebene. Da die Rotationsachse im Erdkörper kleine Schwankungen ausführt (vgl. Bd. I, S. 559), so ist auch die Meridianrichtung namentlich in hohen Breiten nicht ganz konstant; ihre Schwankungen spielen aber nur dei den genauesten astronomischen und geodätischen Messungen eine Rolle.

3. **Instrumente.** Zur Bestimmung der Lotrichtung oder der dazu rechtwinkligen horizontalen Richtungen, sowie der Meridianrichtung, dienen je nach der geforderten Genauigkeit sehr verschiedenartige Instrumente und Methoden (5).

3a) Lot und Setzwage. Das einfachste Mittel zur Bestimmung der Lotrichtung ist ein über dem Beobachtungsort befestigter möglichst biegsamer Faden, an dem ein Gewicht hängt; diesem gibt man meist die Form eines unten zugespitzten Rotationskörpers, dessen Spitze in der Verlängerung des Fadens liegt (streng genommen verläuft nur das untere Ende des Fadens vertikal, während die gekrümmte Kraftlinie der Schwere sich von dem oberen Ende abbiegt). Führt das Lot Pendelbewegungen aus, so entspricht seine Mittellage der Lotrichtung; um solche Schwingungen durch Dämpfung zu vernichten, läßt man den Lotkörper in eine Flüssigkeit tauchen, und um die Einwirkung von Luftströmungen auf den Faden zu verhindern, schließt man das ganze Lot in eine Glasröhre ein.

Mittelbar wird das Lot auch zur Feststellung einer horizontalen Richtung angewandt, indem man es an die Spitze eines gleichschenkligen Dreiecks hängt; gibt man dem Dreieck (der „Setzwage" oder „Bleiwage") eine solche Lage, daß das Lot auf die Mitte der Grundlinie weist, so liegt diese horizontal.

3b) Dosenlibelle. Ein sehr handliches Instrument zum Horizontalrichten einer Ebene erhält man durch Verschließen eines kurzen zylindrischen Gefäßes mit einem innen kugelförmig ausgeschliffenen Glasdeckel; füllt man das Gefäß bis auf eine kleine Luftblase mit einer leichtbeweglichen Flüssigkeit, so nimmt die Blase stets den höchsten Punkt der Kugelfläche ein, steht also in der Mitte des Deckels, wenn der Boden der Dosenlibelle horizontal liegt. Um zu prüfen, ob der Deckel nicht schief aufgesetzt ist, setzt man das Instrument auf eine Platte, deren Neigung durch Fußschrauben oder untergeschobene Keile korrigiert wird, bis die Blase in der Mitte einspielt; dreht man die Dosenlibelle darauf um 180°, so soll die Blase in der Mitte bleiben; stellt sie sich anders ein, so entspricht die Mitte zwischen den beiden Einstellungsorten dem Punkt, den die Blase bei horizontaler Lage des Bodens einnehmen würde. Ist der Fehler nicht zu groß, so kann man ihn durch Abschleifen des Bodens korrigieren.

3c) Röhrenlibelle. Auf demselben Prinzip beruht die „Wasserwage" oder Röhrenlibelle, in roher Form ein schwach gekrümmtes Glasrohr, das bis auf eine nicht zu kleine Luftblase mit Wasser oder Alkohol gefüllt ist und mit der konvexen Seite nach oben benutzt wird. Für genauere Zwecke, namentlich auch zur Messung sehr kleiner Neigungen gegen den Horizont, stellt man Libellen („Niveaus") her durch Ausschleifen eines Glasrohrs mittels eines metallenen Dorns, dessen Achsenschnitt durch Kreisbögen von sehr großem Krümmungsradius begrenzt wird; das dadurch tonnenartig ausgehöhlte Rohr füllt man mit wasserfreiem Aether (wasserhaltiger löst geringe Mengen des Glases auf, die sich wieder kristallinisch ausscheiden und die freie Beweglichkeit der Blase hindern) und verschließt es, meist durch Zuschmelzen, nachdem man alle Luft durch Erwärmung bis zum Sieden ausgetrieben hat. Um die Länge der von Aetherdampf, nicht von Luft gebildeten Blase, die sich bei Temperaturschwankungen ändert, nach Wunsch vergrößern oder ver-

kleinern zu können, bringt man am Ende des Rohrs eine mit einer kleinen Oeffnung versehene Kammer an („Kammerniveau"); durch Neigen der Röhre kann man dann überschüssigen Dampf in der Kammer abfangen, oder, wenn die Blase verlängert werden soll, aus der Kammer austreten lassen. Eine zu große Blasenlänge verringert den Meßbereich, eine zu kleine beeinträchtigt die Genauigkeit, sie vergrößert die „Trägheit" der Blaseneinstellung. Für Messungszwecke (vgl. den Artikel „Winkelmessung") wird die Röhre mit einer Skala versehen, um die Lage der Blasenenden gegen die Skalenstriche ablesen zu können. Je nach dem Verwendungszweck wird das Niveau in einer passenden Metallfassung mit gegeneinanderwirkenden Schrauben oder Federn und Schrauben befestigt, und durch Umhüllung mit schlechten Wärmeleitern, bis auf die durch einen Glasdeckel hindurch ablesbare Skala, vor der Einwirkung von Wärmestrahlung geschützt.

3d) Kanalwage. Um eine horizontale Visierlinie zu erhalten, benutzt man das Prinzip der kommunizierenden Röhren: man verbindet zwei Glasröhren durch einen Schlauch und füllt soviel Wasser hinein, daß über die Oberflächen in beiden Röhren hinweg visiert werden kann; zur Vermeidung der störenden Kapillarwirkungen an den Röhrenwänden dienen zwei mit Diopter-einrichtung versehene Schwimmer, deren Visiermarken gleich hoch über den Eintauchgrenzen liegen müssen. Eine Prüfung in dieser Beziehung läßt sich ausführen, indem man einmal bei großem und darauf bei kleinem Abstand beider Röhren ein fernes Objekt anvisiert, wobei die eine Röhre in beiden Fällen am selben Platz und der Wasserspiegel in ihr in derselben Höhe bleiben muß; zielt die Visierlinie bei kleinem Abstand der Röhren auf einen höheren Punkt als bei großem, so steht die vom Beobachter abgewandte Visiermarke zu hoch und der Schwimmer muß beschwert werden.

3e) Quecksilberhorizont. Die freie Oberfläche einer Flüssigkeit, am besten Quecksilber, bildet eine vollkommen horizontale Spiegelfläche, die aber durch Wellenbildung infolge von Erschütterungen oder Luftzug leicht gestört wird. Um sich vor dem ersten Uebelstand möglichst zu schützen, benutzt man als Gefäß eine oberflächlich amalgamierte kupferne Schale von der Form einer flachen Kugelkalotte von großem Krümmungsradius, deren Mitte nur wenige Millimeter tiefer liegt als der Rand; etwaige Wellen auf der Quecksilberoberfläche, die von steilen Wänden fast ungeschwächt reflektiert werden würden, werden in der flachen Randzone durch Dämpfung vernichtet. Zum Schutze vor Luftzug bedeckt man den Quecksilberhorizont mit einem dachförmigen Kasten, der mit möglichst planparallelen Fenstern versehen ist. Will man eine sehr genau horizontale Oberfläche erhalten, so muß man dafür sorgen, daß einseitig wirkende Erwärmung ferngehalten wird, da die Oberfläche an wärmeren und daher weniger dichten Stellen höher steigt. Genügt geringere Genauigkeit, so kann statt des Quecksilbers ein fester Spiegel dienen, der mittels Fußschrauben und Aufsatzlibelle horizontal gestellt wird.

3f) Gyroskopkollimator. Zur Erzeugung einer virtuellen unendlich fernen Marke im Horizont eines Sextantenfernrohrs hat Fleuriais ein Instrument konstruiert (6), den Gyroskopkollimator. Ein Kreisel (Fig. 1) trägt zwei gleiche Plan-

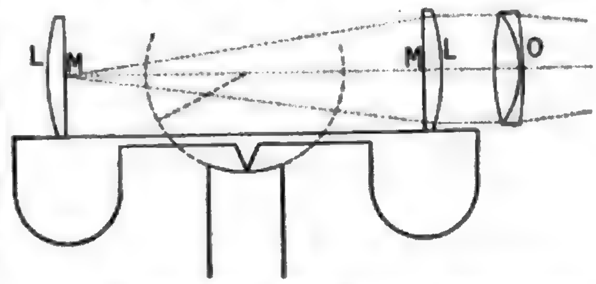


Fig. 1. Prinzip des Gyroskopkollimators.

konvexlinsen L, auf deren Planflächen horizontale Marken M eingeätzt sind, die genau die optische Achse der Linsen schneiden müssen. Die Entfernung der Linsen ist gleich ihrer Brennweite, ihre optischen Achsen fallen zusammen und stehen senkrecht auf der Kreiselachse. Das Krümmungszentrum des Lagers, in dem die Kreiselspitze spielt, soll in die optische Achse der Linsen fallen und der Schwerpunkt des Kreisels soll nahe unter der Spitze liegen. Steht die Rotationsachse vertikal, so entwirft jede Linse bei ihrem Vorübergang am Fernrohrobjektiv 0 ein im Horizont liegendes unendlich fernes Bild der Marke auf der anderen Linse; führt die Kreiselachse eine Präzessionsbewegung aus, so schwankt das Bild symmetrisch um die horizontale Lage. Steht die Verbindungslinie der Marken nicht senkrecht auf der Kreiselachse, so erscheint die eine Marke über, die andere ebensoweit unter dem Horizont und man sieht wegen der schnellen Rotation natürlich beide Marken gleichzeitig dauernd als Doppellinie. Ein systematischer Fehler würde durch exzentrische Lage der Marken auf den Linsenflächen verursacht werden; dieser läßt sich aber durch Drehen beider Linsen in ihren Fassungen um 180° bestimmen. In Drehung versetzt wird der Kreisel durch einen Blasebalg, dessen zwei gegenüberliegende Düsen tangential gegen Flügel blasen, die über den Rand des Kreisels verteilt sind.

3g) Kreiselkompaß. Hängt man einen um eine horizontale Achse rotierenden Kreisel so auf, daß die Achse durch die Wirkung der Schwere in horizontaler Lage gehalten wird, sich aber im Horizont frei drehen kann, so strebt die Achse ihre Lage im Weltraum beizubehalten, also ihr östliches Ende über den Horizont zu erheben; dem wirkt die Schwere entgegen und zieht die Achse wieder in die Horizontalebene zurück, worauf die Achse (vgl. den Artikel „Drehbewegung") durch Ausweichen in horizontaler Richtung antwortet, und zwar in dem Sinne, daß sie sich in den Meridian so einstellt, daß ihr Drehungssinn mit dem der Erde gleichgerichtet ist. Anschütz in Kiel hängt den durch einen Drehstrommotor angetriebenen Kreisel an einem Quecksilberschwimmer auf, der eine Kompaßrose trägt. Die Richtkraft ist wesentlich größer als beim magnetischen Kompaß; der störende Einfluß der Schiffsbewegungen, die eine Deviation verursachen, ist bei günstiger Aufstellung auf großen Schiffen, deren Bewegungen langsam sind, mit genügender Genauigkeit vorausberechenbar (7).

4. Anwendung der Instrumente. Die Wahl der Hilfsmittel und Methoden zum Horizontal- oder Vertikalrichten von Instrumententeilen hängt hauptsächlich von der anzustrebenden Genauigkeit ab.

4a) Vertikalstellung von Prismen und Zylindern. Bei mäßiger Genauigkeit sehr bequem und jederzeit leicht zu improvisieren ist ein Lot, längs dessen Faden man aus zwei zueinander senkrechten Richtungen nach dem lotrecht zu stellenden Stab visiert. Ist eine größere Genauigkeit erforderlich, so benutzt man ein rechtwinklig an einer Horizontalachse befestigtes Fernrohr mit Fadenkreuz, dessen Achse man entweder nivelliert (s. unter 4d) oder durch Visieren auf verschieden hohe Punkte eines Lotfadens horizontal gestellt hat; dann bewegt sich die optische Achse des Fernrohrs in einer Vertikalebene und kann daher zum Vertikalstellen einer anvisierten Linie dienen.

Handelt es sich darum, die vertikale Drehungsachse eines Instruments möglichst genau vertikal zu stellen, so befestigt man an ihr ein Niveau (Röhrenlibelle), liest auf dessen Skala die Lage der Blase ab, dreht darauf die Achse um 180° und wiederholt die Ablesung; stimmen beide Ablesungen überein, so steht die Projektion der Achse auf die Vertikalebene, in der das Niveau liegt, lotrecht, und man wiederholt die Operation in einer zur vorigen rechtwinkligen Vertikalebene. Ist aber die Projektion der Achse A (Fig. 2) auf die Libellenebene um den Winkel z gegen die Vertikale V geneigt, so sind die beiden Niveauablesungen B und B′ verschieden, und man hat das Instrument mittels seiner Fußschrauben so zu neigen, daß die Niveaublase in die Mitte B″ zwischen den beiden Ablesungen einspielt. Sind drei Fußschrauben vorhanden, so stellt man zweckmäßig das Niveau anfangs parallel der Verbindungslinie zweier Fußschrauben, korrigiert die Neigung in dieser Richtung und braucht bei der Korrektion in der senkrechten Richtung nur die dritte Fußschraube allein zu drehen, ohne daß dadurch die erste Korrektion zerstört wird; zeigt sich bei der Kontrolle, daß man zuerst nicht genau

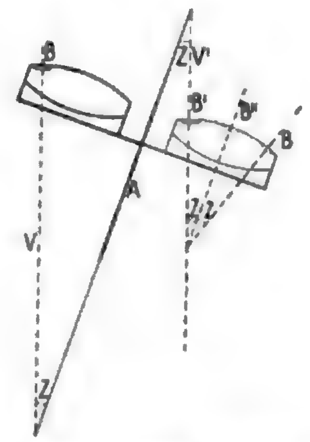


Fig. 2. Vertikalachse mit Libelle.

genug parallel gestellt hat, so daß eine nochmalige Korrektion in der ersten Ebene erforderlich ist, so dreht man beide Fußschrauben gleichzeitig in entgegengesetztem Sinne, um die Neigung in der zweiten Richtung möglichst wenig zu verändern.

4b) Vertikalstellung der optischen Achse eines Visierfernrohrs. Das einfachste und genaueste Mittel, um die optische Achse eines auf Unendlich eingestellten Fernrohrs mit Fadenkreuz vertikal abwärts zu richten, bietet der Quecksilberhorizont. Beleuchtet man das Fadenkreuz von der Okularseite her durch eine zwischen Auge und Okular gebrachte, um 45° gegen die optische Achse geneigte Glasplatte und eine seitwärts aufgestellte Lichtquelle, so treten die vom Fadenkreuz ausgehenden Strahlen parallel aus dem Objektiv in der Richtung der optischen Achse aus, werden, wenn diese lotrecht steht, vom Quecksilberspiegel in sich selbst zurückreflektiert und vom Objektiv wieder zu einem reellen Bilde vereinigt, das mit dem Fadenkreuz zusammenfällt; ist die Achse etwas gegen die Vertikale geneigt, so erscheint das Bild neben dem Fadenkreuz.

Um die optische Achse eines Fernrohrs vertikal aufwärts zu richten, benutzt man einen Zenitkollimator; ein Objektiv, in dessen Brennpunkt ein Faden-

kreuz angebracht ist, wird mit einem ringförmigen, in Quecksilber schwimmenden Träger so verbunden, daß das Fadenkreuz lotrecht über dem ihm zugewandten Hauptpunkt des Kollimatorobjektivs steht. Bringt man dieses Instrument über das Objektiv des Fernrohrs, so erscheint in diesem das Kollimatorfadenkreuz im Zenit; steht die optische Achse des Kollimators nicht genau vertikal, so dreht man ihn um 180° und stellt das Fernrohr auf die Mitte zwischen den beiden Kollimatorbildern ein.

4c) Horizontierung einer Ebene. Das bequemste Mittel hierzu ist die Dosenlibelle. Größere Genauigkeit bietet eine Röhrenlibelle mit großem Krümmungsradius, die justierbar mit einer ebenen Fußplatte oder besser mit drei Füßen (zwei feste an einem Ende, eine Fußschraube am anderen) verbunden ist. Die Handhabung ist ganz analog der unter 4a erläuterten, mit dem einzigen Unterschiede, daß man das Niveau auf der Ebene umsetzt, statt die Vertikalachse zu drehen. Das Niveau justiert man zweckmäßigerweise so, daß seine Blase beim Aufsetzen auf eine horizontale Unterlage möglichst genau in der Mitte der Skala einspielt; dann braucht man es nur, wenn die äußerste erreichbare Genauigkeit gefordert wird, um 180° zu drehen, um den etwa noch vorhandenen Nullpunktsfehler (die einer genau horizontalen Unterlage entsprechende Blaseneinstellung) zu berücksichtigen; ist dieser klein genug, so genügt es, das Aufsatzniveau nur in zwei zueinander senkrechten Lagen zum Einspielen zu bringen.

4d) Horizontierung eines Zylinders. Soll ein Zylinder oder eine an beiden Enden mit zylindrischen Zapfen versehene Instrumentenachse, die in V-förmigen Lagern ruht, nivelliert (horizontal gerichtet) werden, so benutzt man ein Niveau, das sich mit zwei ebenfalls V-förmig ausgeschnittenen Füßen auf die Zapfen stellen (Fig. 3) oder hängen (Fig. 4) läßt. Auch in diesem Falle korrigiert

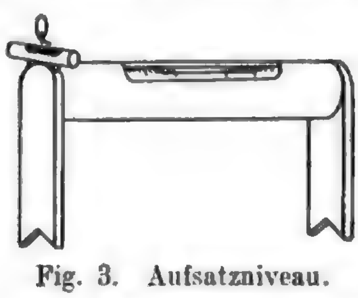


Fig. 3. Aufsatzniveau.

man den Nullpunkt des Niveaus durch Heben oder Senken des einen Endes der Niveauröhre innerhalb der Fassung; außerdem muß die Niveauröhre aber noch genau parallel der zu nivellierenden Achse liegen und wird zu diesem Zwecke auch horizontal justierbar im Niveauträger gelagert. Man prüft die Parallelität, indem man den auf die Achse gesetzten Niveauträger ein wenig um die Achse dreht, so daß die Niveaufüße etwas gegen die Vertikale geneigt stehen, und beobachtet, ob die Blaseneinstellung dabei unverändert bleibt; das ist nur bei Parallelität der Fall; bewegt sich aber die Blase z. B. nach rechts, wenn der Beobachter

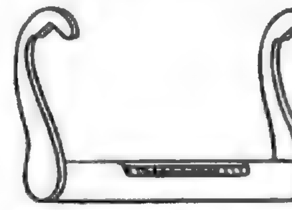


Fig. 4. Hängeniveau.

das Niveau zu sich heranzieht, so zeigt das, daß das rechte Ende des Niveaus jetzt relativ zum linken höher liegt als vorher, daß es also innerhalb seiner Fassung, falls es ein Aufsatzniveau ist, an den Beobachter herangezogen, wenn es ein Hängeniveau ist, von ihm entfernt werden muß, um die Parallelität herzustellen. Da es nicht möglich ist, diesen Fehler auf die Dauer mit vollkommener Genauigkeit zu beseitigen, so bringt man, um seine Wirkung möglichst unschädlich zu machen, senkrecht zum Hauptniveau ein kleines Querniveau (Q in Fig. 3) an, um für jede Niveauablesung die Füße in dieselbe Lage gegen die Vertikale bringen zu können.

Sind die zylindrischen Zapfen der nivellierten Achse nicht genau gleich dick, so erhält man durch Umsetzen des Niveaus und Ablesung in beiden Lagen nicht die Neigung der Achse gegen den Horizont, sondern die Neigung der Verbindungslinie jener Punkte, in denen sich die Schenkel der V-förmigen Ausschnitte der Füße schneiden (vgl. den Artikel „Winkelmessung"); hat man also durch Korrigieren an den Fußschrauben des Instruments diese Linie horizontal gestellt, so ist damit noch nicht die Achse horizontal geworden. Legt man jetzt die Achse in ihren Lagern um, und nivelliert nochmals, so äußert sich ein Dickenunterschied der Zapfen darin, daß man jetzt aus den Niveauablesungen eine scheinbare Achsenneigung erhält, die aber doppelt so groß ist wie die wahre, falls die Niveaufüße in demselben Winkel (in der Regel 90°) ausgeschnitten sind wie die Achsenlager; man hat also, um die Achse nunmehr horizontal zu stellen, nur die Hälfte der zuletzt erhaltenen Neigung fortzukorrigieren.

4e) Horizontierung einer optischen Achse. Versieht man die beiden Enden eines Fernrohrs mit außen zylindrischen, gleich dicken Zapfen, und justiert das Fadenkreuz so, daß es beim Drehen des Fernrohrs um seine Zapfen auf denselben möglichst fernen Objektpunkt gerichtet bleibt, daß also die optische Achse mit der Rotations-

achse zusammenfällt oder wenigstens ihr parallel ist, so braucht man das Fernrohr nur ebenso zu nivellieren wie eine Horizontalachse, um seine optische Achse horizontal zu stellen. Nach diesem Prinzip werden Nivellierinstrumente gebaut; die gebräuchlicheren kleinen Nivellierinstrumente, mit denen natürlich keine so hohe Genauigkeit erreicht werden kann, bestehen aus einem einfachen Fernrohr, das mit einer nur justierbaren, nicht umlegbaren Libelle verbunden ist. Ob in diesem Falle die optische Achse beim Einspielen des Niveaus horizontal liegt, prüft man durch Anvisieren eines Objekts und Zurückvisieren mit dem an den Ort dieses Objekts versetzten Nivellierinstrument nach seinem ersten Standort; trifft die Visierlinie jetzt beim Einspielen der Libelle auf den früheren Standort, so ist die Justierung richtig, trifft sie auf einen höheren oder tieferen Punkt, so muß das Fernrohr auf die Mitte zwischen dem neuen Visierpunkt und dem ersten Standort gerichtet und die Libelle zum Einspielen in diese Lage gebracht werden.

Nach demselben Prinzip wie die um Zapfen drehbaren Nivellierfernrohre baut man auch Kollimatoren, um die optische Achse eines beliebigen Fernrohrs durch Einstellung auf den nivellierten Kollimator horizontal stellen zu können (vgl. auch 3f).

4f) Bestimmung der astronomischen Meridianrichtung. Die einfachste, schon im frühesten Altertum angewandte Methode ist die Beobachtung gleicher Höhen eines Gestirns vor und nach seinem Meridiandurchgang; durch Halbieren des Winkels zwischen den beiden horizontalen Richtungen, in denen die gleiche Höhe erreicht wurde, erhält man den Meridian. Benutzt man die Sonne, wobei die Höhenbeobachtung durch Messung der Schattenlänge eines vertikalen Stabes (Gnomon) auf einer horizontalen Ebene ersetzt werden kann, so muß namentlich zur Zeit der Aequinoktien berücksichtigt werden, daß sich die Deklination der Sonne zwischen beiden Beobachtungsmomenten geändert hat; man hat an der erhaltenen Meridianrichtung eine ähnliche Korrektion anzubringen wie die Mittagsverbesserung bei Zeitbestimmungen aus korrespondierenden Sonnenhöhen (vgl. den Artikel „Zeitmessung"). Größere Genauigkeit erhält man durch Beobachtung eines Fixsterns zur Zeit seiner Kulmination; hat man kein geeignetes Instrument zur Verfügung, so erhält man die Meridianrichtung bis auf wenige Bogenminuten genau schon mit einem einfachen Lot, hinter dessen Faden man den kulminierenden Stern verschwinden läßt (8). Vgl. auch 3g.

Literatur. *1.* **R. v. Eötvös**, *Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, Neue Folge* 59, *S. 354, 1896; Verhandlungen der XV. allgemeinen Konferenz der Internationalen Erdmessung, S. 337, Berlin 1908.* — *2.* **O. Hecker**, *Beobachtungen an Horizontalpendeln über die Deformation des Erdkörpers unter dem Einfluß der Sonne und des Mondes, Berlin 1907.* — **W. Schweydar**, *Untersuchungen über die Gezeiten der festen Erde und die hypothetische Magmaschicht, Potsdam 1912.* — *3.* **F. R. Helmert**, *Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie, I. Teil, Leipzig 1880, II. Teil, 1884.* — *4.* **Th. Albrecht**, *Formeln und Hilfstafeln für geographische Ortsbestimmungen, IV. Aufl., S. 145, Leipzig 1908.* — *5.* **L. Ambronn**, *Handbuch der astronomischen Instrumentenkunde, I. Band, Berlin 1899.* — *6.* **Fleuriais**, *Comptes rendus* 103, *S. 1305, Paris 1886; Referat: Zeitschrift für Instrumentenkunde* 8, *S. 28, Berlin 1888.* — *7.* **O. Martienssen**, *Physikalische Zeitschrift* 7, *S. 535, Leipzig 1906.* — **Anschütz-Kaempfe**, *Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie* 37, *S. 366, Hamburg 1909; Zeitschrift für Instrumentenkunde* 31, *S. 220, Berlin 1911.* — *8. Genauere, die Benutzung astronomischer Instrumente voraussetzende Methoden findet man in jedem Lehrbuch der praktischen Astronomie.*

B. Wanach.

Riechstoffe.

1. Allgemeines. 2. Herkunft und Gewinnung. 3. Chemische Natur und Systematik.

1. Allgemeines. Wir haben Riechstoffe im allgemeinen und im engeren Sinne zu unterscheiden. Die ersteren sind solche, welche einen mehr oder weniger wahrnehmbaren, anhaltenden Wohlgeruch aussenden; sie stellen ein Gemenge von riechenden und geruchlosen Stoffen dar. Im engeren Sinne wird man solche Substanzen als Riechstoffe bezeichnen, welche chemische Individuen sind und die Eigenschaft besitzen, in bestimmter Verdünnung oder Verteilung angenehm auf die Geruchsnerven zu wirken. Wenn eine Substanz als Riechstoff verwertbar sein soll, so ist es vor allem erforderlich, daß sie in festem oder gelöstem Zustande in einem gewissen Grade flüchtig ist, mit anderen Worten: sie muß bei gewöhnlicher Temperatur einen bestimmten Dampfdruck (Dampftension) besitzen, damit sie einen Reiz auf unsere Geruchsnerven ausüben kann. Welch unendlich kleine Mengen von Substanz hierfür genügen, zeigt das Beispiel des Moschus und des Merkaptans (letzteres findet übrigens als Riechstoff keine Verwendung). Um den Geruch von Moschus, eines Gemisches von riechenden und geruchlosen Stoffen, zu erkennen, sind nach Berthelots Schätzung 0,000000000000000001 g und noch weniger nötig; vom Merkaptan, einer organischen Schwefelverbindung, bringt der 460000000.

Teil eines Milligrammes noch den charakteristischen Geruch hervor (E. Fischer u. Penzoldt, Lieb. Annal. 239, 131).

2. Herkunft und Gewinnung. Riechstoffe liefert vor allem die Pflanzenwelt, einige wenige nur die Tierwelt, wie Moschus, Zibet, Ambra. Von den Pflanzen kommen die höher organisierten, die Phanerogamen, in Betracht, besonders die Labiaten, Umbelliferen, Cruciferen und Lauraceen. Diese enthalten in den Oelzellen ein flüchtiges (ätherisches) Oel von oftmals komplizierter Zusammensetzung.

Die ätherischen Oele werden nach folgenden Verfahren gewonnen:

1. Die Rohmaterialien, wie Blüten, Blätter, Stengel, zerkleinerte Samen, Früchte, Holzteile werden mit Wasserdampf behandelt (das Nähere bei Gildemeister u. Hoffmann, s. Literatur). Da das Destillationswasser häufig noch wertvolle Teile des Oeles gelöst enthält (auch in kolloider Form), so findet dasselbe je nach Bedarf eine weitere Verwendung (Beispiel: das Rosenwasser).

2. In den Fällen, in denen das Pflanzenmaterial ein Erhitzen auf ungefähr 100° nicht verträgt, findet die Gewinnung des ätherischen Oeles in folgender Weise statt (Beispiele: Akazien-, Heliotrop-, Reseda-, Jasmin-, Veilchen-, Tuberosenblüten):

a) Der Riechstoff der frisch gepflückten Blüten wird durch eine reine geruchlose Fettmasse (Rindstalg, Schweinefett usw.) absorbiert, welche auf Holzrahmen (sogenannten châssis) ausgebreitet ist; Prinzip der Enfleurage. Dieses Verfahren, nur im südlichen Frankreich üblich, liefert die entsprechenden Pomaden, denen durch Alkohol das ätherische Oel entzogen werden kann.

b) Die Blüten werden bei einer Temperatur von 50 bis 70° mit reinen Fetten oder fetten Oelen ausgezogen; Prinzip der Maceration oder Enfleurage à chaud. Ausgezogenes Material wird durch frisches ersetzt usf., bis sich das Oel mit dem Riechstoffe zur gewünschten Stärke gesättigt hat. Auch hier ist es Brauch, durch Ausschütteln mit Alkohol den Riechstoff abzuscheiden.

c) Die Blüten werden bei gewöhnlicher Temperatur mit reinem Aether, Petroläther oder anderen niedrig siedenden Lösungsmitteln übergossen; Prinzip der Extraktion. Das Lösungsmittel nimmt neben dem Riechstoffe Farbstoffe, Fette u. a. auf; es wird bei niedriger Temperatur verdampft.

d) Die Schalen der Citrusfrüchte (Zitronen, Bergamotten, Orangen usw.), welche in dünnwandigen Zellen reichlich ätherisches Oel besitzen, werden zerquetscht; das herausfließende Oel wird gewöhnlich in Schwämmen aufgefangen; durch Ausdrücken derselben gewinnt man das Oel, welches darauf filtriert wird.

e) In einigen wenigen Fällen ist das ätherische Oel im Pflanzenmateriale glykosidartig gebunden. Durch fermentative Spaltung wird z. B. das in den bitteren Mandeln enthaltene Amygdalin in Benzaldehyd, C_6H_5CHO, Blausäure und Zucker gespalten. Der von Blausäure befreite Benzaldehyd kommt dann als Bittermandelöl in den Handel.

Von pflanzenphysiologischem Interesse ist die Bildung von Riechstoffen in den abgepflückten Jasmin- und Tuberosenblüten (A. Hesse, Z. f. angew. Chemie 25, 363 [1912]). Diese Blüten liefern, währenddem sie den Enfleurageprozeß durchmachen, 1 bis 3 Tage lang neue Mengen Riechstoffe. Bei diesem Verfahren entstehen außerdem noch Verbindungen, die für den Geruch von Bedeutung sind, so z. B. das Indol in den Jasminblüten. Während bei dem Extraktions- und beim Destillationsverfahren der Lebensprozeß der Blüte aufhört, dauert bei der Enfleurage das Leben der Blüte fort, bis sie verwelkt ist. Nach Hesse (l. c.) geben 1000 kg Jasminblüten bei der Extraktion 178 g Oel, bei der Destillation 194 g, bei der Enfleurage 1784 g, während in den enfleurierten Blüten noch 195 g Oel verbleiben. Zum Vergleich sei angeführt, daß 3500 kg Rosenblüten 1000 g Rosenöl bei der üblichen Wasserdampfdestillation liefern.

3. Chemische Natur der Riechstoffe. Systematik. Die Verbindungen nun, welche in den Riechstoffen der Natur vorkommen, gehören fast allen Körperklassen der organischen Chemie an; zu nennen wären besonders die Terpenverbindungen und andere zyklische und kettenförmige Verbindungen. Im einzelnen sei erwähnt das Indol, C_8H_7N, (im Jasmin- und Orangenblütenöle) und das Skatol (β-Methylindol), das im Kote, im Zibet u. a. nachgewiesen wurde. Man hat wohl versucht, zur Erklärung des Riechstoffcharakters einer chemischen Verbindung sogenannte aromato- oder odorophore Gruppen im Moleküle anzunehmen. Die Erfolge sind geringe gewesen. Den Geruch einer chemischen Verbindung durch Einführung von Gruppen, wie die Methyl-, Phenyl-, Nitrogruppe u. a., abzuändern oder zu verstärken, ist gelungen. Jedoch ist es bis jetzt nicht möglich gewesen, die Beziehungen zwischen Konstitution und Geruch einer Verbindung aufzuklären. Daß gewisse Gruppen und Gruppierungen im Molekül einer Verbindung dieser Riechstoffcharakter verleihen können, ist zweifellos, so die Alkohol-, Aldehyd-, Keton-, Phenol-, Nitrogruppe,

äther-, ester-, laktonartige Bindungen usw. Auch Doppelbindungen sind oft für den Geruch von Verbindungen wesentlich.

3a) Terpene. Der größere Teil der wertvollsten Riechstoffverbindungen gehört der Terpenklasse an (vgl. Gildemeister und Hoffmann, s. Literatur). Deshalb mögen einige Vertreter dieser Klasse zuerst Erwähnung finden: Das Terpineol, $C_{10}H_{17}(OH)$, kann künstlich aus Terpentinöl gewonnen werden (als Gemisch von mehreren Isomeren) und bildet ein fliederähnlich riechendes Oel. Von gleichfalls öliger Beschaffenheit sind Geraniol, $C_{10}H_{17}(OH)$, Citronellol, $C_{10}H_{19}(OH)$ und Linalool, $C_{10}H_{17}(OH)$. Die ersteren beiden kommen zusammen im Rosenöl vor und riechen rosenartig. Linalool, $C_{10}H_{17}(OH)$, ein Hauptbestandteil des Linaloeöles (aus Linaloeholz), ist außerdem im Bergamot-, Lavendel-, Orangenblüten- (Neroli-)-Oel u. a. frei oder verestert enthalten. Der Essigsäureester des Linalools, das Linalylacetat, ist ein wertvoller Bestandteil des französischen Lavendelöles und des Bergamottöles. — Allgemeiner bekannt ist das in langen weißen Nadeln kristallisierende Menthol, $C_{10}H_{19}(OH)$, von starkem pfefferminzartigem Geruche; es wird in reichlichen Mengen aus dem japanischen Pfefferminzöle gewonnen und findet in der Parfümerie und in der Medizin Verwendung (Migränestifte). Gleichfalls bekannt ist der Kampfer, $C_{10}H_{16}O$ (sogenannter Japankampfer); er ist ein Keton im Gegensatze zu den vorher angeführten Verbindungen, welche alkoholische Natur besitzen. Der Kampfer wird bei der Destillation des Holzes vom Kampferbaume erhalten; beim künstlichen Produkte, dem sogenannten synthetischen Kampfer, der dieselbe chemische Zusammensetzung hat, nur optisch verschieden ist, geht man vom Terpentinöle aus. — Citral, $C_{10}H_{16}O$, ein Aldehyd, ist der Hauptbestandteil des Lemongras- und Zitronenöles, es bedingt den erfrischenden Geruch des letzteren. Aus Citral wird durch Kondensation mit Aceton das ψ-Ionon gebildet und dieses durch Säuren in das wichtige Ionon (Gemisch zweier Isomeren) übergeführt (vgl. Tiemann und Krüger, Ueber Veilchenaroma. Ber. d. D. chem. Ges. **26**, 2675 [1893]). Das Ionon, $C_{13}H_{20}O$, ein Keton, ist ein hellgelbliches Oel, welches in alkoholischer Lösung deutlich nach Veilchen riecht. Bemerkenswert ist die Eigenschaft des Ionons, die Geruchsnerven vorübergehend in der Weise zu affizieren, daß der Veilchengeruch nicht wahrgenommen wird.

3b) Aromatische Aldehyde. Von aromatischen Aldehyden mögen der bereits erwähnte Benzaldehyd, Heliotropin und Vanillin aufgeführt werden. Das Heliotropin oder Piperonal, $C_6H_3(CH_2O_2)CHO$, wird aus Safrol, $C_6H_3(CH_2O_2)CH_2.CH:CH_2$, dem Hauptbestandteil des Sassafrasöles, durch Oxydation gewonnen; die Darstellung aus Piperin, das in mehreren Pfefferarten vorkommt, hat nur historische Bedeutung. Es sind farblose, am Lichte gelb werdende Kristalle von heliotropartigem Geruche, sie werden als Basis des Heliotropgeruches verwendet. — Vanillin, $C_6H_3(OH)(OCH_3)CHO$, nach Vanille riechende und schmeckende Kristalle, findet sich in glykosidartiger Bindung in den Vanilleschoten. Durch Fermentation und andere Mittel wird das Glykosid gespalten und die vorher geruchlose Schote nimmt den bekannten Vanillegeruch an. Die frühere künstliche Darstellung aus dem im Kambialsafte von Coniferen enthaltenen Glykoside Koniferin (vgl. Tiemann und Haarmann, Ber. d. D. chem. Ges. 7, 613) ist durch die aus Eugenol bezw. aus Isoeugenol verdrängt worden. Durch Oxydation des Phenols Eugenol, $C_6H_3(OH)(OCH_3)CH_2.CH:CH_2$, des Hauptbestandteils des Nelkenöls, wird jetzt Vanillin gewonnen. — Eine laktonartige Verbindung ist das Kumarin, $C_9H_6O_2$; es kommt in den Tonkabohnen, im Waldmeister, Steinklee u. a. vor und kann hieraus durch Ausziehen mit Alkohol gewonnen werden, besser jedoch synthetisch aus Salicylaldehyd und Essigsäureanhydrid. Das Kumarin stellt nach Waldmeister und frischem Heu riechende, farblose Kristalle dar.

3c) Esterartige Verbindungen. Von den esterartigen Verbindungen seien folgende genannt: Anthranilsäuremethylester, $C_6H_4(NH_2)COOCH_3$, erinnert in verdünntem Zustande an Orangenblütenöl, er ist in diesem Oele und im Jasminblütenöle (beim Enfleurageverfahren) enthalten und wird künstlich aus Naphtalin gewonnen. Dem Orangenblütenöle ähnlich riechen auch der Methyl- und Aethyläther des β-Naphthols. — Der Träger der Kleeparfüms ist das Amylsalicylat, den Hauptbestandteil des Jasminblütenöles macht Benzylacetat aus, während Bornylacetat die Grundlage für die Tannennadelparfüms abgibt.

3d) Riechstoffe aus dem Tierreich. Als Riechstoffe aus dem Tierreiche werden Moschus, Zibet und Ambra benutzt, aber in starker Verdünnung. Ueber die Zusammensetzung der wertvollen Ambra, eines Ausscheidungsstoffes des Pottwals, ist nichts bekannt geworden. Der Träger des Moschusgeruches ist das Keton Muskon, $C_{16}H_{30}O$ (oder $C_{15}H_{28}O$). Zibet ist der Inhalt einer zwischen After und Geschlechtsteil liegenden Drüse der männlichen und weiblichen Zibetkatze. Es ist eine gelbliche, nachdunkelnde salbenartige Masse, welche zum größeren Teil aus Fetten besteht und ungefähr 0,1 % Skatol enthält. Alkoholische Auszüge von Moschus

und Zibet werden in der Parfümerie als sogenannte Fixateure benützt. Die Fixateure dienen dazu, den Geruch von Parfüms anhaltender und ausgiebiger zu machen (vgl. auch die Artikel „Terpene", „Alkohole", „Aldehyde" u. a.).

Literatur. ***E. Gildemeister und Fr. Hoffmann,*** *Die ätherischen Oele, Berlin, 1. Aufl., 1899; 2. Aufl., 1. Bd., 1910.* — ***R. Knoll,*** *Synthetische und isolierte Riechstoffe, Halle 1908.* — ***G. Cohn,*** *Die Riechstoffe, Braunschweig 1904.* — ***F. Rochussen,*** *Aetherische Oele und Riechstoffe, Leipzig 1909.* — ***J. P. Durvelle,*** *Fabrication des Essences et des Parfums, Paris 1908.* — ***P. Jeancard und C. Satie,*** *Abrégé de la Chimie des Parfums, Paris 1904.* — ***H. Zwaardemaker,*** *Die Physiologie des Geruches, Leipzig 1895.*

E. Deussen.

Rieß

Peter Theophil.

Geboren am 27. Juni 1805 in Berlin, gestorben ebenda am 23. Oktober 1883. Er lebte als Privatmann in Berlin und wurde 1842 Mitglied der Akademie der Wissenschaften. Seine zahlreichen Untersuchungen auf dem Gebiet der Reibungselektrizität hat er in einem Werk „Die Lehre von der Reibungselektrizität" zusammengefaßt.

E. Drude.

Riesentöpfe

= Strudellöcher. Es sind Ausstrudelungen oder Auskolkungen, welche durch schnell fließendes Wasser mit Hilfe von rotierenden Steinen im festen Gestein hervorgebracht werden. Sie entstehen so unter Gletschern (Gletschertöpfe), aber auch in Stromschnellen; die Klammen der Alpen stellen vielfach ein zusammengeflossenes System von Strudellöchern dar (vgl. die Artikel „Eis" und „Flüsse").

Riffe.

In geographischem Sinne, aus Wasseransammlungen aufragende Felspartien. In geologischem Sinne, kalkige, dolomitische, auch kieselige, ungeschichtete, von Organismen (Korallen, Bryozoen, Spongien) aus dem Meeresgrunde aufgebaute, kuppel- oder kastenförmige Gesteinsmassen (vgl. den Artikel „Mineral- und Gesteinsbildung auf wässerigem Wege").

Ringelerze.

Auf Erzgängen vorkommende Bildungen, bei denen Bruchstücke des Nebengesteins von konzentrischen Erzlagen umwachsen sind. Sie werden auch Kokardenerz genannt (vgl. den Artikel „Erzlagerstätten").

Rippelmarken

= Wellenfurchen, auch Windfurchen. Sie entstehen auf dem Grunde nicht allzutiefer Wasserbecken durch die Wellenbewegung (vgl. den Artikel „Meer"), oder auf dem Sande der Dünen infolge der Windbewegung (vgl. den Artikel „Atmosphäre") und gleichen versteinerten Wasserwellen. Sie kommen vielfach fossil vor und sind im Winter auch auf dem Schnee zu beobachten.

Ritter

Johann Wilhelm.

Geboren 1776 in Samitz bei Hainau in Schlesien, gestorben am 23. Januar 1810 in München. Er war zunächst Pharmazeut und studierte dann in Jena, wo er in dürftigen Verhältnissen lebte. Herzog Ernst II. von Gotha berief ihn dorthin und gab ihm die Mittel, physikalische Untersuchungen in größerem Maßstab anzustellen. 1804 wurde er als Mitglied der bayerischen Akademie der Wissenschaften nach München berufen und verfiel dort mehr und mehr der Naturphilosophie. Ritter hat vorwiegend Untersuchungen über galvanische Erscheinungen unternommen, er ist der Erfinder der Trockensäule. 1798 entdeckte er die ultraroten Strahlen, 1803 gab er die ersten Grundlagen des Akkumulators. Die wissenschaftliche Elektrochemie sieht in ihm ihren Begründer.

Literatur. ***W. Ostwald,*** *J. W. Ritter; Bericht über die erste Jahresversammlung der Deutschen Elektrochemischen Gesellschaft, Berlin 1894.*

E. Drude.

Rivinus

August Quirinus.

Geboren am 9. Dezember 1652 zu Leipzig als Sohn des Arztes Andreas Rivinus (gen. Bachmann). Er studierte in Leipzig, wurde dort 1671 Magister artium und siedelte dann zur Fortsetzung seiner Studien nach Helmstedt über, wo er 1676 zum Dr. med. promovierte. Von 1677 ab wirkte er als Arzt in Leipzig und habilitierte sich gleichzeitig an der dortigen Universität. 1691 wurde er ordentlicher Professor der Physiologie und Botanik. Auch die Professuren für Pathologie und Therapie verwaltete er später und wurde 1719 Dekan der medizinischen Fakultät. Er starb am 30. Dezember 1723.

Als Botaniker hat er ein wenig glückliches System entworfen, das in seiner Schrift „Introductio generalis in rem herbariam" (Leipzig 1690, 2. Ausgabe ebendort 1696) veröffentlicht ist; als Einteilungsprinzip tritt hier die Regelmäßigkeit oder Unregelmäßigkeit der Blumenkrone in den Vordergrund. In derselben Schrift tritt er für

die binäre Nomenklatur ein. Aber auch als Anatom ist er u. a. hervorgetreten; so beschrieb er in der Schrift „De dyspepsia" (Leipzig 1679) den von ihm entdeckten und nach ihm benannten Ausführungsgang der Glandula sublingualis. Diese und seine meisten übrigen kleineren Abhandlungen sind unter dem Titel „Dissertationes medicae diversis temporibus habitae nunc vero in unum fasciculum collectae" (Leipzig 1710) gesammelt.

Literatur. ***Lischwitz***, *Oratio panegyrica funebris (Leipzig 1724).* — ***Du Petit-Thouars*** *in Biographie universelle ancienne et moderne, Nouvelle édition (Paris 1843 bis 1865).*

W. Ruhland.

Roberval

Giles Personne de.

Geboren am 8. August 1602 in Roberval bei Beauvais, gestorben am 27. Oktober 1675 in Paris. Er wurde 1627 Professor am Collège Gervais in Paris, später Professor der Mathematik am Collège royal de France und Mitglied der Pariser Akademie. Roberval konstruierte ein Gewichtsaräometer und eine Dezimalwage.

Literatur. ***Condorcet***, *Éloge de R., Paris 1778.* — ***J. E. Montucla***, *Histoire des mathematiques 1802.*

E. Drude.

Robins

Benjamin.

Geboren 1707 in Bath, Somerset, gestorben 29. Juli 1751 in Ostindien. Er war Privatlehrer in London, wurde 1749 General-Ingenieur der englisch-ostindischen Compagnie. Im Jahre 1740 unternahm er ballistische Versuche, bestimmte die Geschwindigkeit der Geschosse und den Luftwiderstand.

E. Drude.

Rogenstein.

Ein aus kleinen runden, dem Fischrogen vergleichbaren Kügelchen von kohlensaurem Kalk bestehender Kalkstein verschiedener Formationen (vgl. den Artikel „Karbonatgesteine").

Romé de l'Isle

Jean Baptiste Louis.

Geboren am 26. August 1736 zu Gray in der Franche-Comté; gestorben am 7. März 1790 zu Paris. Obwohl er der Sohn armer Eltern war, wurde ihm doch der Besuch des Gymnasiums zu Paris möglich. 1757 ging er dann als Sekretär eines Artillerie- und Geniedetachements mit nach Indien, geriet bei Pondichery in die Gefangenschaft der Engländer und wurde von ihnen nacheinander nach Tranquebar, St. Thomas und China geführt. Nach seiner Rückkehr (1764) nach Frankreich beschloß er, durch die reiche Gelegenheit zu mannigfachen naturwissenschaftlichen Beobachtungen während seiner Reise angeregt, sich ganz den Naturwissenschaften zu widmen. Sage nahm ihn unter seine Schüler auf und unterstützte ihn auch mit Geld. Späterhin gewährte ihm die Freigiebigkeit von Michelet d'Emmery und nach dessen Tode Ludwig XVI. die Mittel zum Unterhalt. Außerdem hielt er Privatvorlesungen ab, die nach kurzer Zeit sehr gut besucht wurden.

Romé de l'Isle ist durch sein Werk „Essai de cristallographie" (1772 Paris; ins Deutsche übertragen von Ch. Weigel, Greifswald 1777; in 2. Auflage erschienen als „Cristallographie ou description des formes propres à tous les corps du règne minéral etc., Paris 1783) der Begründer der Kristallographie in Frankreich geworden. Er zeigte darin zuerst durch zahlreiche Messungen von ebenen Winkeln, in der 2. Auflage auch von Kantenwinkeln (mit Hilfe von Carangeots Goniometer), daß die verschiedenen Gestalten einer Spezies in innerem Zusammenhange stehen und erkannte den wunderbar symmetrischen Bau der Kristalle. Ferner sprach er dort bestimmter und allgemeiner als es früher, zum Beispiel durch Nikolaus Steno, geschehen, das Gesetz von der Konstanz der Kantenwinkel und als etwas Neues das Gesetz des Flächenparallelismus aus. Weitere für die Kristallographie grundlegende Beobachtungen sind in dem Werke „Des caractères extérieurs des minéraux" (Paris 1784) enthalten.

Literatur. ***Lamétherie:*** *J. B. L. Romé de l'Isle, Journal de physique XXXVI, April 1790.*

K. Spangenberg.

Römer

Olaus (Ole).

Geboren am 25. September 1644 in Aarhuus in Dänemark, gestorben am 19. September 1710 in Kopenhagen. Er war ein Schüler von Picard, der ihn veranlaßte, nach Paris zu gehen, wo er von 1671 bis 1681 als Lehrer des Dauphin lebte. Dann kehrte er nach Kopenhagen zurück, wurde dort Professor der Mathematik, Bürgermeister und Staatsrat. 1676 berechnete er die Lichtgeschwindigkeit aus den Verfinsterungen der Jupitermonde. Er ist der Erfinder des Meridiankreises. 1728 gingen bei einer Feuersbrunst fast alle seine astronomischen Beobachtungen verloren.

E. Drude.

Röntgenstrahlen.

A. Physik der Röntgenstrahlen. 1. Erzeugung der Röntgenstrahlen. 2. Nachweis der Strahlung. 3. Die physikalische Natur der Röntgenstrahlen: a) Geschwindigkeit der Röntgenstrahlen. b) Polarisation. c) Wellenstruktur und Wellenlänge. d) Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. 4. Röntgenstrahlen höherer Ordnung. 5. Absorption und „Spektrum" der Röntgenstrahlen. 6. Röntgenstrahlen, deren Spektra von kontinuierlicher oder linienhafter Art sind. 7. Fluoreszenz im Röntgenspektrum. 8. Wirkungen der Röntgenstrahlen: a) Erzeugung von Kathodenstrahlen. b) Erzeugung von Wärme. c) Ionisierung. d) Chemische Wirkung. e) Fluoreszenzerregung. B. Röntgentechnik. 1. Der Aufbau einer Röntgenanlage im allgemeinen. 2. Stromquellen. 3. Induktor. 4. Unterbrecher. 5. Hilfsapparate. 6. Unmittelbarer und mittelbarer Betrieb mit Wechselstrom. 7. Röntgendynamomaschinen. 8. Röntgenröhren. 9. Radioskopie. 10. Radiographie. 11. Blendentechnik. 12. Meßkunde. 13. Fernaufnahmen. 14. Momentaufnahmen und kinematographische Aufnahmen. 15. Dosierung der Strahlungsenergie. C. Aerztliche Röntgenpraxis.

A. Physik der Röntgenstrahlen.

1. Die Erzeugung der Röntgenstrahlen. Der Ursprungsort der Röntgenstrahlen (entdeckt Ende 1895) ist dort, wo Kathodenstrahlen auf Materie treffen (über die Erzeugung und die physikalische Bedeutung der Kathodenstrahlen wird im Artikel „Kathodenstrahlen" berichtet). Die materielle Masse ist somit eine Art von Transformator, der Kathodenstrahlenenergie in die Energie der Röntgenstrahlung umsetzt. So entstehen die Röntgenstrahlen beispielsweise dort, wo in den bekannten Crookesschen Röhren die Kathodenstrahlen die Glaswand treffen und den typischen Fluoreszenzfleck erzeugen. Unter den Anforderungen der Praxis hat die Röntgenröhre die mannigfaltigsten Wandlungen ihrer Form erfahren; wirklich brauchbar ist sie erst durch die Einführung der Antikathode geworden (Neesen und König, 14. bezw. 28. Febr. 1896).

Unter Fortlassung allen für die Betrachtung des Prinzips unnötigen technischen Beiwerkes stellt sich eine Röhre zur Erzeugung der Röntgenstrahlen nach Figur 1 folgendermaßen dar. In drei röhrenförmige Ansätze einer geräumigen Glaskugel G sind Elektroden eingeschmolzen, von denen die meist stiftförmige Anode und die mit einer Kugelkalotte versehene Kathode aus Aluminium bestehen, während die der Kathode gegenüberstehende Antikathode, dort wo die Kathodenstrahlen ihre Vereinigung finden, mit einem Platinblech versehen ist. Das Vakuum der Röhre muß ein sehr hohes sein, der Gasdruck etwa von der Größenordnung 0,0001 bis 0,000001 mm Quecksilbersäule. Werden durch Zuführung hochgespannter elektrischer Energie von zirka 30 000 bis 120 000 Volt Kathodenstrahlen erzeugt und auf die Antikathode geworfen, so

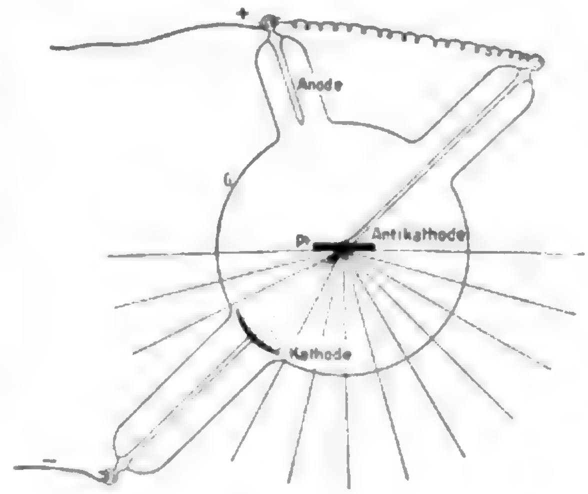


Fig. 1.

ist diese als Ausgangspunkt von Röntgenstrahlen zu betrachten, die nach allen Punkten des Raumes fortschreiten, von denen aus ein Auge die von den Kathodenstrahlen getroffene Fläche der Antikathode sehen kann.

2. Nachweis der Röntgenstrahlen. Die Röntgenstrahlen können unmittelbar durch keinen unserer Sinne wahrgenommen werden. Ihr Nachweis erfolgt: a) durch elektrische Entladungserscheinungen, b) durch Fluoreszenzerregung (Radioskopie), c) durch chemische Wirkung (Radiographie).

3. Die physikalische Natur der Röntgenstrahlen. Wie später gezeigt wird, ist der Mangel jeder Brechbarkeit der Röntgenstrahlen an der Grenzfläche zweier für sie verschieden dichter Medien kein Grund, ihnen eine physikalische Beschaffenheit ähnlich den sich im Aether fortpflanzenden Energiestrahlen bekannter Art, d. h. den elektromagnetischen (elektrischen Wellen, Wärme-, Lichtstrahlen usf.) abzusprechen. Man braucht zur Voraussetzung nur eine Wellenlänge zu machen, deren räumliche Ausdehnung gegen die Dimensionen des Atoms und gegen die molekularen Abstände der wägbaren Materie relativ klein ist. Unter dieser Voraussetzung würde auch das Fehlen jeder regelmäßigen Reflexion der Röntgenstrahlen verständlich sein.

Volle Klarheit über das Wesen der Röntgenstrahlung in prinzipiellem Sinne können zwei Bestimmungen bringen: a) die Feststellung ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit, b) der Nachweis ihrer Polarisierbarkeit. Gelingt letzteres und zeigt sich außerdem die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Größenordnung der Lichtwellen, so ist am Charakter

der Röntgenstrahlen als einer elektromagnetischen Strahlung, deren elektrische und magnetische Vektoren normal zueinander und senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung stehen, nicht mehr zu zweifeln. Man wäre dann berechtigt, von einer optischen Natur der Röntgenstrahlen zu sprechen; obgleich anscheinend die Gesetze der geometrischen Optik an ihnen unerfüllt bleiben.

3a) Ausbreitungsgeschwindigkeit der Röntgenstrahlen. Nachdem einige Versuche R. Blondlots resultatlos verlaufen waren, hat E. Marx zwei Reihen von Untersuchungen veröffentlicht, die eine Bestimmung der Röntgenstrahlengeschwindigkeit zum Gegenstand haben. Er folgt dabei einer Methode, die nach einem Vorschlage Des Coudres bereits von E. Wiechert zur Bestimmung der Kathodenstrahlengeschwindigkeit mit Erfolg benutzt worden war. Der Grundgedanke der Marxschen Methode ist folgender: Eine sehr kleine Röntgenröhre R (Fig. 2) wird durch einen elektromagnetischen Schwingungskreis von sehr hoher Frequenz (ähnlich den von Lecher und Blondlot benutzten Sendern) erregt. Nur die von a nach b verlaufende Schwingung löst dabei einen Impuls von Röntgenstrahlen aus, der, auf dem Wege A fortschreitend, das durchlässige Fenster D einer hochevakuierten Röhre durchdringt und auf die Platinelektrode P fällt. Zugleich mit dem Röntgenstrahlenstoß trifft bei P über den, mit einer verschiebbaren Brücke Br versehenen Weg BBB eine vom Sender erregte elektromagnetische Welle ein. Sie pflanzt sich an den Drähten entlang fort, wie bei den bekannten Versuchen von Lecher. Es sei nun vorgreifend bemerkt, daß Röntgenstrahlen an bestrahlten Körpern, also auch an der Platinelektrode P, sekundäre Kathodenstrahlen d. h. Elektronen auslösen. Beobachten wir, was geschieht, wenn sich der Strahlungsstoß und die elektromagnetische Welle zugleich bei P bemerkbar machen. Trifft mit dem Strahlungsstoß gleichzeitig eine P negativ aufladende Phase der Welle ein, so wird die Elektronenemission unterstützt, bei einer positiven Phase jedoch entsprechend herabgesetzt. Beides hängt vom Verhältnis der Wege A und B ab, von denen der zweite mit Hilfe der verschiebbaren Brücke Br verlängert und verkürzt werden kann. Die Intensität des Elektronenstromes läßt sich mittels eines Faradayschen Käfigs F, der die sekundäre Kathodenstrahlung auffängt, und eines geerdeten Elektrometers El bestimmen. Eine Verschiebung der Brücke ergibt dann eine Reihe von Maxima und Minima, die sich durch entsprechende Vergrößerung des Weges, den der Strahlungsstoß nimmt (A) kompensieren lassen. Muß, um jedesmal die gleichen Wirkungen zu erhalten, der Weg über A um das gleiche Stück vergrößert werden wie über B, so folgt daraus, daß sich die Röntgenstrahlen mit derselben Geschwindigkeit wie die elektromagnetischen Wellen fortpflanzen. Nach Marx trifft dies zu; danach besitzen also die Röntgenstrahlen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes.

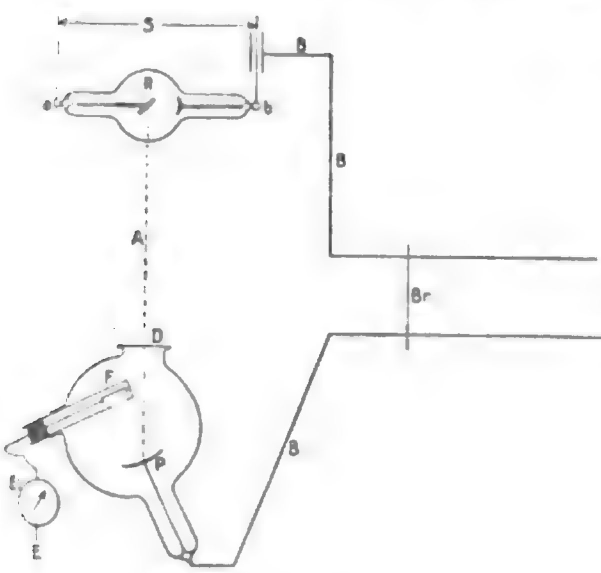


Fig. 2.

Gegen die später vielfach veränderte Marxsche Versuchsanordnung und ihre Beweiskraft sind, namentlich von J. Franck und R. Pohl, eine Reihe von Bedenken erhoben worden, die von mehreren Gelehrten geteilt werden. Hierüber möge die am Schluß des Artikels aufgeführte Fachliteratur eingesehen werden. Dennoch dürfte gegen das Resultat selbst wohl von keiner Seite ein Einspruch vorliegen. Man spricht den Röntgenstrahlen allgemein Lichtgeschwindigkeit zu.

3b) Polarisation der Röntgenstrahlen. Der zweite Beweis für die optische Natur der Röntgenstrahlen (im Sinne elektromagnetischer Querwellen) ist ihre Polarisierbarkeit. Die Versuche stammen von Ch. G. Barkla, der eine große Reihe vortrefflicher Arbeiten über Röntgenstrahlen veröffentlicht hat. Er benutzt die von Röntgen beobachtete Tatsache der Röntgenstrahlenzerstreuung. Von der Kathode einer Röntgenröhre R (Fig. 3) möge ein primäres Strahlenbündel p ausgehen, das auf eine materielle Masse k_1 (bei Barkla ein Stück Kohle) fällt. Es erzeugt hier eine nach allen Seiten verlaufende sekundäre Strahlung, von der ein ausgewähltes Bündel s den Körper k_2 trifft und an ihm tertiäre Strahlen erzeugt. Die Intensität des tertiären Bündels t wird gemessen. Barkla findet sie in der Richtung, die den primären Strahlen entgegengesetzt

ist (also in der Zeichnungsebene) größer als senkrecht dazu. Hieraus ergibt sich eine ungleiche Beschaffenheit des sekundären Strahlenbündels in bezug auf normal zueinander stehende Richtungen im Raume, also eine unzweideutige Polarisation. Auch

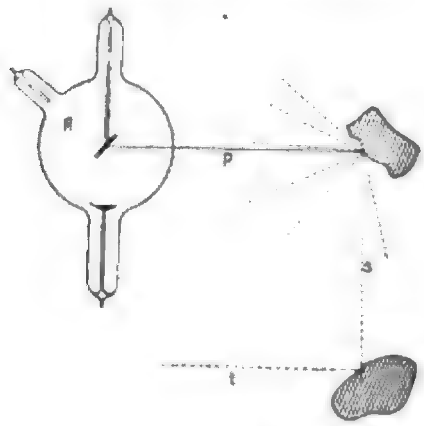


Fig. 3.

an primären Strahlen hat Barkla eine durch E. Baßler und J. Herweg bestätigte teilweise Polarisation feststellen können. Die Polarisationsebene verläuft im Sinne jener Ebene, die die Fortpflanzungsrichtung der Röntgenstrahlen und zugleich die Achse des auf die Antikathode fallenden Kathodenstrahlenbündels enthält. Die Beobachtungsmethode ist eine ähnliche wie oben angegeben. Ueber die sich aus diesen Beobachtungen ergebenden theoretischen Folgerungen sei verwiesen auf J. Stark, Die Prinzipien der Atomdynamik, II § 40.

3c) Wellenlänge und Struktur der Röntgenstrahlung. Wennschon sonach die Röntgenstrahlung mit Sicherheit als ein Ausbreitungsvorgang im Aether von der Art der elektromagnetischen Wellen angesprochen werden darf, so ist doch der unmittelbare Vergleich mit den Lichtwellen nur unter gewissen Einschränkungen statthaft. Jedenfalls hat man die Strahlung in das Gebiet des äußersten Ultraviolett zu verweisen, da alle anderen Spektralbezirke durch bereits bekannte Strahlenarten ausgefüllt sind. Auch spricht der Mangel jeder regelmäßigen Reflexion und Brechbarkeit sowie der Beugungsfähigkeit an den in der Optik benutzten engen Spalten für eine Wellenlänge, gegen die die molekularen Abstände, vielleicht auch die Abmessungen der Atome, verhältnismäßig groß sind (s. Abschnitt 3d). Aus diesem Grunde kann man die Wellenlänge der Röntgenstrahlen jedenfalls nicht größer als 0,1 μ (= 0,1 tausendstel Millimeter) ansetzen. Wahrscheinlich sind sie aber noch sehr viel kleiner, nämlich etwa von der Größenordnung 0,001 μ bis 0,00001 μ. Hierfür spricht die später zu erörternde Auslösung von Elektronen (Kathodenstrahlen) durch Röntgenstrahlen und die Beziehungen, die in dieser Hinsicht zu der gleichen Eigenschaft ultravioletter Strahlen vorhanden sind.

Auch die Struktur der Wellen dürfte von derjenigen der bisher bekannten elektromagnetischen Strahlen verschieden sein. Während man sich beispielsweise unter einem Lichtstrahl einen Zug zusammenhängender Wellen vorzustellen hat, muß man der Röntgenstrahlung eine Art von aufgelöster, zerrissener Struktur beilegen. Jedes von der Kathode nach der Antikathode geschleuderte Elektron prallt mit einem materiellen Atom zusammen; hierbei verursacht es einen Strahlenimpuls. Aus einer unzusammenhängenden Reihenfolge derartiger kurzer Impulse von ungeheurer Frequenz ($< 3.10^{-11}$ sec.$^{-1}$) und entsprechend geringem räumlichen Wellenmaß, mit Lichtgeschwindigkeit ausgestattet, hat man sich also die elementare Röntgenstrahlung zusammengesetzt zu denken. Der besondere physikalische Vorgang ist dabei nach der Theorie von E. Wiechert und G. G. Stokes folgender. Jedes Elektron hat an der Kathode, durch die treibenden elektrischen Kräfte beschleunigt, Energie aufgenommen und diese Energie zum Aufbau eines magnetischen Feldes verwandt, von dem das Elektron auf seinem Fluge begleitet wird. Beim Zusammenstoß mit einem Atom bezw. mit dessen Kraftfeld wird das Elektron verzögert und ein Teil der Energie geht, aus dem zusammenbrechenden Kraftfeld stammend, als elektromagnetischer Impuls in den Raum hinaus. Die Periode dieser elektromagnetischen Impulsschwingung ist dabei von der Geschwindigkeit des Kathodenstrahlelektrons und den zufälligen, längere oder kürzere Zeit andauernden Geschwindigkeitsänderungen des Elektrons im Kraftfelde des Atoms abhängig. Es können also — und die Erfahrung bestätigt dies — von derselben Röhre zu gleicher Zeit Röntgenstrahlen verschiedener Frequenz und Wellenlänge erwartet werden (sogenannte weiche und harte Strahlen nach der technischen Ausdrucksweise). Die elementaren Oszillatoren dieser aus einer kontinuierlichen Reihenfolge von Frequenzen zusammengesetzten Strahlenbündel sind die beim Eindringen in die atomistischen Kraftfelder der Antikathode verzögerten Elektronen.

3d) Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. Mit gewöhnlichen Gittern konnten die Röntgenstrahlen bisher nicht zur Interferenz gebracht werden. Dahingehende Beobachtungen sind wohl mit Recht stets bestritten worden. Erst durch die neuesten Versuche M. Laues ist die Interferenz unzweideutig nachgewiesen. Laue knüpft an die Anschauung von der Raum-

gitterstruktur der Kristalle an und findet an diesen theoretisch eine Konstante von einer den Wellenimpulsen entsprechenden Größenordnung. Indem W. Friedrich und P. Knipping ein ausgeblendetes primäres Röntgenstrahlenbündel durch einen Kristall von regulärer Zinkblende gehen ließen, beobachteten sie in der Tat (1912) rings um den Zentralstrahl verteilte Maxima und Minima, welche die Interferenz unzweideutig erkennen lassen. Die stets auf der photographischen Platte erscheinende Vierzähligkeit ist zugleich ein schöner Beweis für die Berechtigung der 1850 durch Bravais eingeführten Raumgittervorstellung. Mehrfache Interferenzscharen lassen die zusammengesetzte Natur des primären Bündels erkennen.

4. Röntgenstrahlen höherer Ordnung. Jeder Körper, der Röntgenstrahlen absorbiert, sendet seinerseits wiederum Röntgenstrahlen vom Charakter (Durchdringungsfähigkeit) der primären Strahlung aus. Diese sekundäre Strahlung möge als Strahlung höherer Ordnung bezeichnet werden. Sie geht von allen Punkten des vom primären Bündel durchsetzten Körpers aus und verläuft nach allen Raumrichtungen. Entdeckt wurde diese „zerstreute Strahlung" durch Röntgen. Es wurde bereits gesagt, daß sie vorzugsweise in einer Richtung polarisiert ist, die sich aus der Intensitätsmessung des tertiären Bündels ergibt (vgl. 3b).

Man kann sich die Zerstreuung ähnlich vorstellen wie die Zerstreuung der Lichtstrahlen in einem Medium, das Materiestückchen suspendiert enthält, deren lineare Abmessung diejenige der Lichtwellen übertrifft, obgleich man für die Zerstreuung der Röntgenstrahlen kaum die Molekülkomplexe verantwortlich machen wird. Es dürfte sich um einen elementaren Vorgang im Wirkungsbereich der atomistischen Kraftfeder handeln (J. Stark). Dafür spricht auch die Unabhängigkeit der Intensität der sekundären bezw. tertiären zerstreuten Strahlung vom Aggregatzustand des von der primären Strahlung getroffenen Körpers. Nach den Untersuchungen von J. A. Crowther und E. A. Owen hat die zerstreute Strahlung nach allen Seiten zwar denselben Charakter, keineswegs aber dieselbe Intensität. Sie ist am größten in Richtung des aus dem getroffenen Körper austretenden primären Bündels, sehr gering in der Querrichtung, größer dagegen wieder — nämlich etwa doppelt so groß wie in der Querrichtung — nach der Seite hin, die dem einfallenden Primärbündel zugewandt ist.

Die Tatsache der Zerstreuung spricht dafür, daß den elektromagnetischen, äußerst kurzwelligen Impulsen gegenüber, welche die Röntgenstrahlen darstellen, jede Materie als diskontinuierlich erscheinen muß. Von definierten Grenzflächen zweier Medien kann also ebenfalls keine Rede sein. Die Erscheinungen der Brechung und Reflexion, wie man sie im Gebiet längerer Wellen beobachtet, zu denen die Materie im Verhältnis der Kontinuität steht, fallen mithin für die Röntgenstrahlen aus.

5. Absorption und Spektrum der Röntgenstrahlen. Für die Energieschwächung (Absorption) der Röntgenstrahlen ist, wie gesagt, nicht der Molekularverband sondern lediglich das Kraftfeld jedes Atoms maßgebend. Die Größe der Absorption hängt daher nicht von der Dichte sondern vom Atomgewicht der absorbierenden Materie ab. So absorbiert Glas (Silicium) die Röntgenstrahlung stark, Diamant (Kohlenstoff) dagegen nur in sehr geringem Maße.

Die Absorption gestattet nun den Nachweis der zusammengesetzten Natur des primären Röntgenstrahlenbündels. Bereits Röntgen zeigte, daß mit wachsender Schichtdicke der Zahlenwert des Absorptionsindex zunimmt. Diese Tatsache ist verständlich, wenn man annimmt, daß das primäre Bündel aus einem Gemisch kontinuierlich ineinander übergehender Frequenzen, also Impulsen verschiedener Wellenlänge besteht, von denen die längeren stärker als die kürzeren absorbiert werden. Geht dann ein Röntgenstrahlenbündel durch einen absorbierenden Körper, so wird es nicht allein geschwächt, sondern auch in seiner Zusammensetzung verändert, indem es relativ immer ärmer an langwelligen und reicher an kurzwelligen Impulsen wird. Nimmt der Absorptionsindex nicht zu, so hat man es mit einer vorzugsweise homogenen Strahlung zu tun, wie sie bisweilen, von der Antikathode kommend, ebenfalls beobachtet werden kann.

Bemerkt sei an dieser Stelle noch, daß die Impulse kleiner Frequenz (also langer Welle) von langsamen Kathodenstrahlen und diejenigen großer Frequenz (kleiner Welle und großer Durchdringungskraft) von schnellen Kathodenstrahlen erzeugt werden.

Nicht nach ihrem Brechungsindex — denn eine Refraktion ist ja nicht vorhanden — wohl aber nach ihrer Absorbierbarkeit, lassen sich mithin die Impulse eines Röntgenstrahlenbündels nach Frequenz und Impulslänge ordnen. Man darf daher von einem Röntgen**spektrum** sprechen, für dessen Studium uns eben einstweilen kein anderes Mittel als die Absorptionsmessung zur Verfügung steht.

Wennschon auch Ausnahmen beobachtet worden sind, so wird das Spektrum des primären Bündels im allgemeinen als ein kontinuierliches bezeichnet werden dürfen, das nach den hohen Frequenzen um so ausgedehnter erscheint, je größer die Geschwin-

digkeit der Kathodenstrahlen ist. Die geringsten im erzeugten Bündel enthaltenen Frequenzen (die längsten Impulse) können nicht zur Beobachtung kommen, da sie bereits beim Durchgang der Strahlen in der Glaswandung der Röhre zurückgehalten werden.

6. Röntgenspektra von kontinuierlicher und linienhafter Art. Das kontinuierliche Röntgenspektrum, dessen Strahlen als elementaren Oszillator das in das Kraftfeld eines Antikathodenatoms eindringende Elektron haben, wurde im vorausgehenden Absatz beschrieben. Beobachtet worden sind jedoch auch primäre Strahlungen von vorzugsweise homogener Art, die also nur einen engen Frequenzbezirk umfassen. Sie haben als Oszillator anscheinend eine an das Atom selbst geknüpfte und von ihm abhängige Größe. Nach R. Whiddington nämlich tritt diese homogene Strahlung von linienhaftem Charakter (wenn man die aus der Optik her bekannte Bezeichnung hier anwenden darf) stets erst oberhalb eines bestimmten Wertes der kinetischen Energie der erzeugenden Kathodenstrahlen auf und dieser Grenzwert ist von der Natur des Antikathodenmaterials abhängig. Auch das Plancksche Elementargesetz, auf die homogene Strahlung übertragen, würde zu dem gleichen Resultat führen, da es die Entstehung einer linienhaften Emission ausschließt, so lange das Lichtquantum ($h\frac{c}{\lambda} = hn$) bezogen auf die Frequenz der Strahlung größer ist als die kinetische Energie des Kathodenstrahlelektrons $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$.

Am häufigsten wird eine ausgesprochen engbegrenzte, linienhafte Strahlung unter den Strahlungen höherer Ordnung, also unter den oben gekennzeichneten zerstreuten Strahlen eines von der primären Emission getroffenen Körpers beobachtet. Diese linienhafte Strahlung ist stets unpolarisiert, auch wenn die sie erzeugende Strahlung polarisiert ist. Sie entsteht durch die selektive (auswählende) Absorptionsfähigkeit namentlich der schweren Körper Fe, Cu, Ni, Zn, Ag für Röntgenstrahlen bestimmter Impulslänge. Während Aluminium, wie bereits mitgeteilt, (und z. B. auch Mg, C) für nahezu alle Impulslängen gleich durchlässig ist und einen Absorptionsindex besitzt, der mit der Schichtdicke zunimmt, zeigt sich bei den schweren Elementen zwar auch eine allgemeine Absorption aber außerdem ein spezifisches Absorptionsvermögen charakteristischer Frequenzen. Das Spektrum der kontinuierlichen Strahlung zeigt nach seinem Durchgang durch die Schwerelemente nicht nur eine allgemeine Schwächung, die mit dem Atomgewicht zunimmt, sondern eine Lücke, gewissermaßen eine „Bande", die nach der Seite der längeren Impulse scharf ausgeprägt nach der Seite der kürzeren verwaschen erscheint. Es sei wiederum hervorgehoben, daß das sogenannte „Spektrum" nicht durch prismatische Zerlegung sondern durch Studium der Strahlenabsorption in Körpern ohne ausgeprägt selektive Eigenschaft (z. B. an Al) entwickelt wird.

Die Lage der Röntgenbande ist verschieden je nach dem Atomgewicht des selektiv absorbierenden Körpers und rückt mit wachsendem Atomgewicht in das Gebiet der höheren Frequenzen — also kürzeren Impulslängen — vor. Es wird also z. B. Platin für Impulslängen noch durchlässig sein, für die Kupfer bereits absperrt, und Kupfer ist dort — für höhere Frequenzen — bereits wieder durchlässig, wo Platin absorbiert. Es ist deshalb durchaus möglich, daß auch die Leichtelemente (Al, C usw.) ausgeprägte Absorptionsbanden besitzen, nur dürften sie im Bereich jener ganz langwelligen Impulse zu suchen sein, die Glas nicht durchdringen und daher der Untersuchung ohne weiteres nicht zugänglich sind. Wennschon bisher immer nur eine Bande mit besonderer Deutlichkeit auftrat, so ist es doch wahrscheinlich, daß die chemischen Elemente deren mehrere, etwa drei, besitzen. Bei Zinn, Jod und Antimon scheinen zwei Banden beobachtet worden zu sein. Jedenfalls sind die spektralen Eigenschaften der Körper den Röntgenstrahlen gegenüber verhältnismäßig einfach. Sie werden lediglich durch ihr Atomgewicht bestimmt.

Diese selektive Absorption ist es nun, die zur Emission der linienhaften Strahlung Veranlassung gibt. Ein von primären Röntgenstrahlen getroffener Körper sendet also unter Umständen zwei Arten sekundärer Strahlung aus, erstens eine kontinuierliche, polarisierte, alle Frequenzen enthaltende, zerstreute Strahlung, deren Intensität nicht nach allen Richtungen dieselbe ist und zweitens, falls er zu den Schwerelementen gehört und eine selektive Absorption besitzt, eine linienhafte, homogene, nicht polarisierte Strahlung, deren Intensität nach allen Seiten dieselbe ist. Unter homogener Strahlung wird hier (im Gegensatz zu J. Stark) eine Strahlung von engem Frequenzbereich verstanden. Ihre Frequenz ist eben so groß oder geringer als die der einfallenden, absorbierenden Strahlen, ihr Absorptionsindex ist von der Schichtdicke unabhängig (vgl. 5).

7. Fluoreszenzähnliche Erscheinungen im Röntgenspektrum. Zusammenfassend

sei noch einmal wiederholt, daß die von den Primärstrahlen getroffenen Leichtelemente, deren Absorptionsbande weit unterhalb der sie durchdringenden Frequenzen liegt, nur polarisierte, zerstreute, kontinuierliche Strahlung sekundär aussenden. Dasselbe tun die Schwerelemente, solange die Frequenz der einfallenden Erregerstrahlen ihre Eigenfrequenz noch nicht erreicht. In dem Augenblick, wo dies der Fall ist, beginnt die Emission der unpolarisierten, sekundären, linienhaften Strahlung, meist sehr viel stärker als die kontinuierliche Strahlung. Sie ist aber auch dann noch vorhanden, wenn die Erregerfrequenz höher ist. Barkla und J. Stark glauben daher in der linienhaften, sekundären Strahlung eine Art von Fluoreszenzvorgang zu erkennen. Sie berufen sich dabei auf die im Bereich der optischen Strahlen im allgemeinen gültige Stokessche Regel, nach der Fluoreszenzlicht von bestimmter Frequenz immer nur durch gleiche oder höhere Frequenzen erregt werden kann.

8. Besondere Wirkungen der Röntgenstrahlen. 8a) Erzeugung von Kathodenstrahlen. Röntgenstrahlen rufen an Körpern, von denen sie absorbiert werden, nicht nur sekundäre Röntgenstrahlen sondern, wie zuerst E. Dorn gezeigt hat, auch Kathodenstrahlen hervor. Die Geschwindigkeit dieser Strahlen ist von derselben Größenordnung, wie diejenige der Kathodenstrahlen, die in der Vakuumröhre die Röntgenstrahlen erzeugt haben (Dorn und Bestelmeyer). Von den ebenfalls erzeugten sekundären Röntgenstrahlen können die sekundären Kathodenstrahlen leicht durch ihre größere Absorbierbarkeit getrennt werden. Die Geschwindigkeit der emittierten sekundären Kathodenstrahlen wird mithin eine sehr verschiedene sein, da das primäre Röntgenstrahlenbündel die verschiedensten Frequenzen enthält. Da höhere Röntgenstrahlfrequenzen durch schnellere Kathodenstrahlen entstanden sind, so werden sie ihrerseits wiederum schnelle Kathodenstrahlen auslösen. Sonst ist aber die Geschwindigkeit der sekundären Kathodenstrahlen von der chemischen Natur des absorbierenden Körpers unabhängig (P. D. Innes, J. Laub, W. Wien, W. Seitz).

Die Aehnlichkeit dieser Kathodenstrahlemission mit jener, die bei der Absorption kurzwelliger Lichtstrahlen beobachtet wird (sogenannte lichtelektrische Entladung), ist unverkennbar. Für die von optischen Wellen ausgelösten Elektronen verlangt das Plancksche Elementargesetz, bezüglich der Anfangsgeschwindigkeit, Unabhängigkeit von der chemischen Natur des bestrahlten Körpers und von der Intensität der einfallenden Erregerstrahlung, dagegen direkte Quadratwurzelabhängigkeit von der Erregerstrahlen-Frequenz. Bei den Röntgenstrahlen tritt diese Abhängigkeit ungemein deutlich in die Erscheinung, auch hier lösen die höheren Frequenzen die schnelleren Kathodenstrahlen (Strahlen größerer kinetischer Energie) aus. Es ist dies ein Grund mehr, den Röntgenstrahlen quasi optische Eigenschaften beizulegen. Bei dem geschilderten Vorgang verschwindet die einfallende Röntgenstrahlenenergie fast völlig, um die Elektronen aus ihrem Verbande loszulösen und zur Kathodenstrahlgeschwindigkeit zu beschleunigen, ebenso wie (in der Röhre) das an die Antikathode prallende Elektron fast seine ganze Energie einbüßen mußte, um den Röntgenimpuls zu erzeugen. Es sei ferner nicht unerwähnt, daß ein Röntgenstrahlenbündel beim Durchsetzen eines sehr dünnen Körpers in der Richtung seiner Fortpflanzung mehr Kathodenstrahlen als senkrecht dazu erzeugt (Cooksey).

Da die Emission von Kathodenstrahlen einen Verlust an negativer Ladung bedeutet, so lädt sich ein isolierter, von Röntgenstrahlen durchsetzter Körper positiv auf.

8b) Erzeugung von Wärme. Ein Körper, der Röntgenstrahlen absorbiert, erwärmt sich (E. Dorn). Man kann diese Wärmeerzeugung aus dem Energieverlust erklären, den die durch die Erregerstrahlung in Bewegung gesetzten Elektronen (Kathodenstrahlen) bei ihrem Zusammenstoß mit den Molekülen des absorbierenden Körpers erfahren.

8c) Ionisierung. Von Röntgenstrahlen durchsetzte Gase werden ionisiert, d. h. sie gewinnen an elektrischer Leitfähigkeit. Nach H. Bragg werden die Strahlen im Gas ebenfalls absorbiert. Sie machen dabei aus neutralen Atomen Elektronen frei, ähnlich wie in festen Körpern. Die so geschaffenen negativen und positiven Ionen können dann in einem elektrischen Felde durch ihre Bewegung einen Elektrizitätstransport ausführen. Schließlich kann man sich auch vorstellen, daß die befreiten Elektronen von großer Geschwindigkeit an neutrale Gasatome anrennen und durch ihre Anlagerung eine größere Menge von Elektronen geringerer Geschwindigkeit aus diesen abstoßen. Ein geladenes Elektroskop wird sich mithin in einem Gase, das von Röntgenstrahlen durchsetzt wird, entladen müssen und kann daher vorzugsweise zur Untersuchung der Röntgenstrahlfrequenzen und ihrer Intensität dienen.

8d) Chemische Wirkung. Ihre Bedeutung für die Praxis haben die Röntgenstrahlen durch ihre Durchdringungsfähigkeit und ihr Vermögen eine photographische Schicht zu verändern, also chemisch zu

wirken, erlangt. Wenn man alle Erscheinungsformen möglichst derselben Erklärung unterwerfen will, so kann man diese Wirkung für eine indirekte halten. Die von den absorbierten Strahlen freigemachten Kathodenstrahlen (Elektronen) führen durch ihre lebendige Kraft eine Dissoziation der Moleküle herbei und geben den Anlaß zu einem chemischen Umsatz.

8e) Fluoreszenzerzeugung. Von gleicher praktischer Bedeutung ist die Fähigkeit der Röntgenstrahlen, an einer Reihe von Körpern (z. B. Bariumplatincyanür, wolframsaurem Kalzium usw.) Fluoreszenzlicht hervorzurufen. Auch diese Erscheinung kann man indirekt deuten, indem man wiederum den sekundär bei der Absorption erzeugten Elektronen die Rolle der Stoßerreger für einen zur Lichtemission befähigten elementaren Oszillator überträgt. Allerdings fluoreszieren durchaus nicht alle Körper sondern vorzugsweise nur diejenigen von hoher Absorptionskraft, was sich mit den theoretischen Anschauungen, die man über den inneren Vorgang bei der Fluoreszenzerzeugung aufgestellt hat, vereinigen läßt.

B. Röntgentechnik.

1. Der Aufbau einer Röntgenanlage im allgemeinen. Die bereits in ihren Hauptbestandteilen geschilderte Röntgenröhre ist technisch als Transformator der elektrischen Energie in die Energie der Röntgenstrahlen zu betrachten; es ist jedoch erforderlich, daß die elektrische Energie in Form sehr hoher Spannung (viele tausend Volt) in die Röhre tritt. Da sie in dieser Form im allgemeinen in unseren Stromquellen (Dynamomaschine, Akkumulator) nicht zur Verfügung steht, so muß der Transformation in der Röhre eine andere vorangehen, welche die Umwandlung der niedriggespannten elektrischen Betriebsenergie in hochgespannte zum Ziel hat. Verfolgt man die Energieumsetzungen, so bekommt man zugleich ein schematisches Uebersichtsbild einer Röntgenanlage.

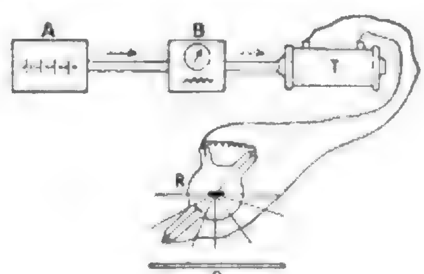


Fig. 4.

Es möge A in Figur 4 die Stromquelle bedeuten, aus der ein verhältnismäßig starker, niedrig gespannter Strom (von etwa 30 bis 220 Volt) entnommen werden kann. In der Richtung des Pfeiles fließt die elektrische Energie zu einer meist auf einer Schalttafel vereinigten Zusammenstellung von Apparaten (B), die den Zweck haben, den elektrischen Strom ein- und auszuschalten, ihn zu messen und in seiner Stärke zu regulieren. Hier kann man sich auch jene Vorrichtung untergebracht denken, die später als Unterbrecher noch besonders gekennzeichnet wird. Von B geht die elektrische Energie zum Transformator T, in dem sie nach einem später zu erörternden Prinzip in die Form hoher Spannung bei entsprechend herabgesetzter Stromstärke verwandelt wird. In Hochspannungsform fließt sie der Röntgenröhre R zu, erzeugt in ihr die Kathodenstrahlen K, die an der Antikathode ihrerseits ihre lebendige Energie in Röntgenstrahlung umsetzen. Als letzter Transformator ist die photographische Platte P oder der Fluoreszenzschirm zu betrachten, an dem die Röntgenstrahlenenergie, nachdem sie den zu durchstrahlenden Körper durchsetzt hat, durch ihre Umsetzung in chemische oder Lichtenergie wahrnehmbar wird.

In nahezu gleicher Reihenfolge sollen die technischen Bestandteile der Anlage näher besprochen werden.

2. Die Stromquellen. Da die neueren Röntgenanlagen stets starke Stromquellen von erheblicher Stromintensität verlangen, so kommen die Primärelemente als Stromlieferanten nicht mehr in Frage. Man benutzt für kleinere Leistungen oder für transportable Anlagen Akkumulatoren, sonst, wenn es irgend sein kann, den Anschluß an eine Zentrale. Je nachdem der Zentralenstrom ein Gleich- oder Wechselstrom ist, fällt die Anlage sehr verschieden aus. Da die Verwendung des Gleichstromes eine bequeme ist und man bisher vorzugsweise die Gleichstromanlagen technisch ausgebildet hat, wird man meist vorziehen, etwa vorhandenen Wechselstrom durch eine der später zu besprechenden Vorrichtungen — rotierenden Umformer, elektrolytische Zellen usf. — zunächst in einen Gleichstrom umzuwandeln.

Die Anlagen für Akkumulatorenbetrieb sind in ihren Abmessungen, namentlich was die Bewickelung des Transformators (Funkeninduktors) angeht, von vornherein für geringe Spannungen — etwa bis zu 30 Volt — berechnet, da die Aufstellung oder Mitführung vieler Akkumulatorzellen mit Unzuträglichkeiten verknüpft ist, namentlich dort, wo zur Ladung der Zellen jedesmal ein Transport auszuführen ist. Auch pflegt die Unterbrechertype dann meist von besonderer Art (Hammer- bezw. Deprez-Unterbrecher) zu sein. Für Akkumulatoren gedachte Anlagen lassen sich daher mit gleichem Vorteil für die höheren Spannungen

der Zentralen ohne entsprechenden Umbau meist nicht benutzen. Ueber die Behandlung der Akkumulatoren findet man in der unter B am Schluß zusammengestellten technischen Röntgenliteratur Auskunft.

3. Der Induktor (Transformator). Die Transformation der elektrischen Energie von niederer auf höhere Spannung (bis zu 120000 Volt und mehr) erfolgt nach dem Faradayschen Prinzip der elektromagnetischen Induktion. Auf einen aus einzelnen Eisendrähten bestehenden Eisenkern E Figur 5

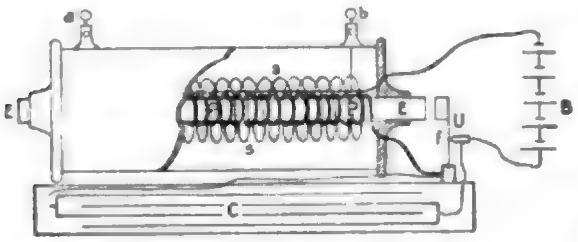


Fig. 5.

ist in wenigen Lagen der verhältnismäßig starke und für größere Stromstärken berechnete Primärdraht P aufgewickelt. Stromschluß und Unterbrechung erfolgt selbsttätig — bei älteren Instrumenten — durch den Hammerunterbrecher U. Um die beim Oeffnen des Unterbrechers infolge der Selbstinduktion in der Primärspule auftretende hohe Spannung aufzufangen und so die für den induktiven Effekt auf die Sekundärspule nachteilige Funkenbildung bei f herabzusetzen, ist beiderseits der Unterbrechungsstelle der Kondensator C angeschaltet. Er lädt sich während der Unterbrechung auf und gibt beim Stromschluß seine Ladungsenergie an die Primärspule wieder ab. Seine Größe muß daher zum Selbstinduktionskoeffizienten der Spule und zur Frequenz des Unterbrechers in abgeglichenem Verhältnis stehen. Die magnetische Kapazität des Eisenkernes ist mit Rücksicht auf die maximale primäre Stromstärke so zu wählen, daß der induktive Effekt ein Maximum wird.

Die über den Primärkern geschobene sekundäre Spule S besteht, im Gegensatz zu der primären, aus einer sehr großen Anzahl Lagen eines sehr dünnen Drahtes. Die primäre Spannung steht zur sekundären für die Oeffnungsphase des Primärstromes angenähert im Verhältnis der Windungszahlen von Primär- und Sekundärspule. Da hierbei für die Röntgenpraxis sehr hohe Werte erreicht werden, müssen die Windungen der Sekundärspule auf das Vollkommenste (im Vakuum) entlüftet und durch eine wachsähnliche Kompoundmasse sowohl gegen einander als auch gegen den Primärkern isoliert werden. Damit nicht Windungen von sehr großer Spannungsdifferenz miteinander in Berührung kommen, wird die Bewickelung in dünnen Scheiben ausgeführt, die dann durch Hintereinanderschaltung miteinander zur Spule verbunden sind. Um die Spule nicht zu gefährden, werden die beiden Endklemmen der S-Spule a und b meist etwas enger gerückt, als der maximalen Schlagweite des Funkeninduktors entspricht. Bei 100 000 Volt beträgt die Schlagweite zwischen einer Spitze (+) und einer Platte (—) etwa 50 cm; sie nimmt im übrigen schneller zu als die Spannung.

Wie jeder Induktionsstrom, so ist auch der hochgespannte Strom des Funkeninduktors ein Wechselstrom, jedoch von äußerst unsymmetrischem Phasenbau. Es hängt dies mit dem durch den Unterbrechungsvorgang geregelten Verlauf des Primärstromes zusammen.

Wegen des beim Stromschluß in der Primärspule selbst induzierten Extrastromes von gegenläufiger Spannung, steigt die primäre Stromstärke nicht plötzlich auf ihren durch das Ohmsche Gesetz bestimmten Höchstwert J an, sondern bedarf dazu einer Zeit, die mit dem Selbstinduktionskoeffizienten L der Primärspule wächst und mit ihrem Ohmschen Widerstand W abnimmt. Die Gleichung

$$1)\qquad i = \frac{E}{W}\left(1 - e^{-\frac{W}{L}t}\right) = J - Je^{-\frac{W}{L}t}$$

zeigt die Abhängigkeit der zugeordneten Größen. i ist die der Zeit t entsprechende augenblickliche Stromstärke, e die Basis der natürlichen Logarithmen. Man sieht, daß erst für $t = \infty$ $i = J$ wird; praktisch erfolgt eine Annäherung an den Maximalwert jedoch schon nach verhältnismäßig kurzer Zeit. So ist für $t = \frac{L}{W}$

$$2)\qquad i = J\left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0{,}63\ J$$

und schon in der doppelten Zeit wird J nahezu erreicht.

Bei der Stromöffnung liegen die Verhältnisse etwas verwickelter. Wird der Stromkreis nicht unterbrochen, sondern nur der Strom durch Ausschaltung der elektromotorischen Kraft beseitigt, so ist die elektromotorische Kraft $E = o$, der Strom hat aber noch seine volle Stärke.

Die bekannte Gleichung für die induzierte Spannung

$$3)\qquad E = J.W + L\frac{di}{dt}$$

geht dann über in

$$-J.W.C = e^{-\frac{W}{L}t}$$

und, da zur Zeit $t = o$

$$i = J = \frac{E}{W},$$

so ergibt sich

$$C = -\frac{1}{E}$$

und

$$4) \qquad i = \frac{E}{W} e^{-\frac{W}{L}} = J e^{-\frac{W}{L} t}$$

Der Strom wird bei der Oeffnung = 0 also erst für die Zeit $t = \infty$, erreicht aber für die Zeit $t = \frac{L}{W}$, wie man sieht, bereits den Wert 0,37 J und ist praktisch in der doppelten Zeit gleich Null.

Bei den Unterbrechern der Funkeninduktoren fällt die Kurve wesentlich steiler ab, da sich der durch den Extrastrom zwischen den Kontakten bildende Funke den Widerstand des Schließungskreises rasch anwachsen und unendlich werden läßt. Es findet in diesem Augenblick eine völlige Oeffnung des Stromkreises statt. Immerhin ist die Kurve der durch Gleichung 4) gegebenen ähnlich. Unter der Voraussetzung, daß der Unterbrecher ohne Zeitverlust sofort nach der Unterbrechung den Strom wieder schließt (was z. B. beim Hammerunterbrecher nicht zutrifft), wird die Intensität des Stromes etwa den in der Figur 6 gezeigten Verlauf nehmen (ausgezogene Kurve). Aus ihr läßt sich nach Gleichung 3 die Spannungsverlaufskurve des induzierten Wechselstromes finden (gestrichelte Kurve). Sie ist unsymmetrisch, da der steile Stromabfall bei der Oeffnung eine bei weitem höhere Spannung induziert als der flache Anstieg beim Stromschluß. In der Röntgenröhre können nur Stromimpulse einer Richtung Verwendung finden, was in den meisten Fällen automatisch geschieht, da die Röhren (siehe Abschnitt 8) eine gewisse Ventilwirkung besitzen und nur die Phase höherer Spannung hindurchlassen. Sind die induzierten Phasen symmetrisch gestaltet, was z. B. der Fall ist, wenn der Transformator (Funkeninduktor) mit Wechselstrom statt mit unterbrochenem Gleichstrom betrieben wird, so bedarf es besonderer Vorrichtungen, um die eine Phase auszuschalten (siehe Abschnitt 6).

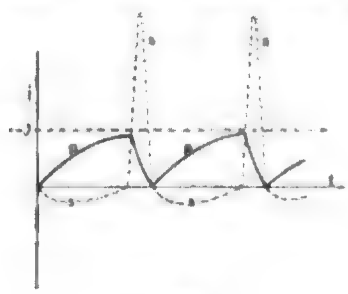


Fig. 6.

Da der beim Stromschluß vom Primärstrom im Eisenkern hervorgerufene Magnetismus bei der Unterbrechung möglichst rasch verschwinden soll, um einen steilen Stromabfall zu erzielen, so ist der Eisenkern offen. Geschlossene Eisenkerne (Ringe) finden jedoch im Wechselstrombetriebe Verwendung.

4. **Unterbrecher.** An einen guten, automatischen und für den Röntgenbetrieb geeigneten Unterbrecher stellt man folgende Anforderungen: a) hohe Frequenz, um das flackernde Licht auf dem Leuchtschirm zu vermeiden und die Expositionszeit bei photographischen Aufnahmen abzukürzen, b) exakte Unterbrechung bei möglichst geringer Funkenbildung, um einen schnellen Stromabfall zu erzielen und die induzierte Oeffnungsspannung so hoch als möglich zu machen. c) Unempfindlichkeit gegen große Stromstärken. d) Unempfindlichkeit gegen hohe Betriebspannungen, letzteres erwünscht, um den Unterbrecher ohne weiteres im Anschluß an das Netz der Zentrale (110 bezw. 220 Volt) verwenden zu können.

Von der außerordentlich großen Anzahl von Unterbrechern seien nur wenige kurz beschrieben, die zugleich als typische Vertreter eines bestimmten Prinzips gelten können.

4a) Der Deprez-Unterbrecher. Statt des Hammers ist vor dem Eisenkern des Induktors ein kleiner Balken aus Weicheisen angeordnet, der um eine Mittelachse schwingen kann. Eine Spannfeder drückt die Kontakte zusammen. Die Frequenz ist höher als die des Hammerunterbrechers, die zur Unterbrechung kommenden Stromstärken können also größer sein. Der Deprez-Unterbrecher ist auch heute noch der gegebene Unterbrecher für kleinere, mit Akkumulatoren betriebene und für transportable Anlagen.

4b) Quecksilberunterbrecher.

α) Tauchunterbrecher. In ein mit Quecksilber Q (Fig. 7, I) teilweise gefülltes Glasgefäß G taucht ein Platinstift S. Um die Funkenbildung bei der Stromöffnung herabzusetzen, geschieht die Unterbrechung in einem flüssigen Isolator (Petroleum), von dem das Quecksilber bedeckt ist. Der Antrieb des Kontaktstiftes erfolgt durch die Schwankungen des Hammers oder durch einen besonderen Motor mit Exzenterscheibe. Der Tauchunterbrecher wird heute kaum noch benutzt.

β) Turbinenunterbrecher (Boas). In einem Eisengefäß E (Fig. 7 II) befindet sich Quecksilber Q, das durch eine kleine, bei a angeordnete Schneckenpumpe in die Dose

d emporgesaugt und dann in scharfen Strahlen s aus kleinen Oeffnungen gegen die Gefäßwandung gespritzt wird, an der es wieder herabrieselt. Zugleich mit der motorisch angetriebenen Achse A, von der auch die Pumpe betätigt wird, wird auch eine Scheibe bewegt, die an ihrem Rande eine Anzahl gegen das Gefäß E isolierter Kontaktstücke k trägt. Jedesmal wenn ein Kontaktstück den Quecksilberstrahl durchschneidet, ist der Strom geschlossen. Die Frequenz des Unterbrechers hängt von der Umdrehungszahl der Achse und der Anzahl der Kontaktstücke ab. Da diese oben breiter sind als unten, läßt sich durch Herabsenken der Scheibe die Stromschlußdauer vergrößern, was bei hoher Frequenz nötig ist, um dem Strom noch genügende Zeit zum Anstieg zu geben. Die Unterbrechungen erfolgen unter Petroleum.

γ) Schleuderunterbrecher (sogenannter Rotax-Unterbrecher). Eine Hohlbirne A aus Eisen wird durch einen vertikal gelagerten Elektromotor M in schnelle Umdrehungen versetzt. Etwas Quecksilber, das sich in ihr befindet, wird dadurch in den Aequator des Gefäßes emporgeschleudert und bildet dort einen Ring von großer Steifigkeit (Q). In diesen Ring taucht eine aus isolierender Substanz bestehende, exzentrisch gelagerte Scheibe S, die an ihrem Rande zwei oder mehr metallische Kontaktstücke k trägt, die mit der Achse und der Stromquelle verbunden sind. Das Kontaktscheibchen wird von dem Quecksilberring in Rotation versetzt und da es im umgekehrten Verhältnis der Durchmesser schneller läuft als dieser, so schmiegen sich die Kontakte in rascher Folge dem Quecksilber an, ohne daß dabei ein Umherspritzen des letzteren auftritt. Die Birne wird leitend mit der Röntgenapparatur verbunden. Auch hier erfolgen die Unterbrechungen unter Petroleum. Die Stromschlußdauer kann durch Veränderung der Achsenstellung des Kontaktscheibchens variiert werden.

4c) Wehnelt-Unterbrecher (1900). In einem Gefäß G (Fig.7 IV) mit verdünnter Schwefelsäure stehen sich zwei Elektroden von sehr verschiedener Oberfläche gegenüber, das Bleiblech B und der Platinstift P. Durch ein Porzellanrohr R ist der Kupferstab, der unten den Platinstift trägt, gegen die Säure isoliert. Platin ist Anode (+), Blei Kathode (—). Enthält der Leitungskreis keine Selbstinduktion, so zeigt sich bei höheren Spannungen — über 80 Volt — folgende Erscheinung. Der den Elektrolyten durchsetzende Strom drängt sich am Platinstift zusammen und erhitzt dort die Säure. Es bildet sich um den Stift eine Dampfblase, die den Strom unterbricht. Befindet sich Selbstinduktion (J) im Stromkreise, so durchschlägt in diesem Augenblick die hohe elektromotorische Kraft des Extrastromes die Dampfschicht (Knallgasexplosion), und der Vorgang beginnt von neuem. Es erfolgen so eine Reihe von Stromschlüssen und Unterbrechungen, deren Frequenz von der angewandten Spannung, der Größe der Platinoberfläche und dem Selbstinduktionskoeffizienten des Stromkreises abhängt. Namentlich die letztere Abhängigkeit hat für den Wehneltunterbrecher besondere Primärspulen der Induktoren nötig gemacht. Nach den Vorschlägen von Walter wird die Spule unterteilt; ihre Windungslagen können dann nach Bedarf parallel, hintereinander oder gemischt geschaltet werden (Walterschaltung). Die Frequenz des Wehnelt-Unterbrechers nimmt zu mit der Betriebsspannung und ab mit wachsender Anodenoberfläche und wachsendem Selbstinduktionskoeffizienten. — Der Unterbrecher eignet sich vorzugsweise für Spannungen zwischen 80 und 220 Volt, hohe Frequenzen und große Energie. Seine Eigenheit, die Röhren stark anzugreifen, wird von vielen Röntgenpraktikern bestritten.

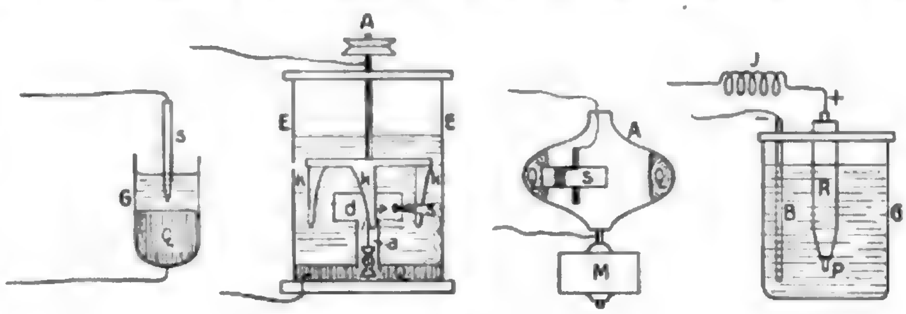


Fig. 7.

Der Simon-Unterbrecher entsteht aus dem Wehnelt durch Zurückziehen des Platinstiftes in seine Porzellanhülle. Der enge, aktive Querschnitt, an dem dann die Unterbrechungen vor sich gehen, ist das Loch der Hülse (Loch-Unterbrecher). Der Simonunterbrecher eignet sich vorzugsweise für hohe Spannungen.

5. Hilfsapparate. Sämtliche Vorrichtungen, die dazu dienen, Stromstärken zu regulieren, Sicherungen, Meßinstrumente, Ausschalter usf., kann man als Hilfsapparate bezeichnen. Die moderne Röntgentechnik ist bestrebt, sie an einer leicht zugänglichen Stelle zu vereinigen, entweder auf einem

Schaltbrett oder fahrbar auf einem Schalttisch. Wegen der Aufmachung dieser Teile mag die technische, am Schluß zusammengestellte Fachliteratur eingesehen werden. Hier soll nur die Verteilung der Instrumente an der Hand einer einfachen Schaltskizze, die eine der vielen Möglichkeiten darstellt, besprochen werden.

Vorausgesetzt ist der Anschluß an eine Zentrale. Die Zuleitungen Z (Fig. 8) durch-

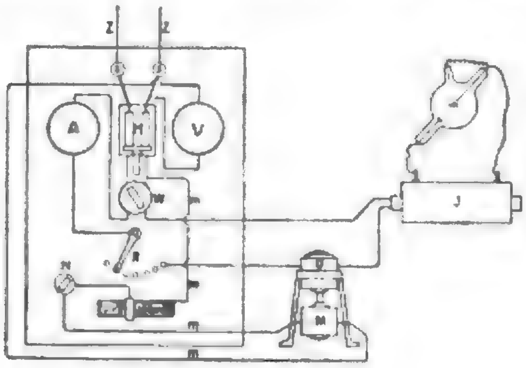


Fig. 8.

laufen zunächst die Sicherungen ss und gelangen dann zum Hauptausschalter H. Von dort geht der Strom über das Ampèremeter A, den Regulierwiderstand R und den Unterbrecher U zum Primärkern des Induktors J, um aus diesem zum Stromwender zurückzufließen. Ein vor dem Stromwender abgezweigter Strom geht ferner durch die Leitung mm über den Regulierwiderstand Rm und den Ausschalter N nach dem Motor M, der den Unterbrecher betreibt. Bei R kann man dann die Stärke des Primärstromes, bei Rm die Frequenz innerhalb weiter Grenzen wählen. Ein von der Hauptleitung abgezweigtes Voltmeter V gestattet die Betriebsspannung abzulesen.

Je nach der Stromart, der verfügbaren Spannung, dem Unterbrechertyp, kann die Schaltung sehr verschieden sein. Sie gestaltet sich für den Deprez- und Wehneltunterbrecher meist einfacher, da der Stromkreis mm fortfällt, für Wechselstrom oft verwickelter.

6. Unmittelbarer und mittelbarer Betrieb mit Wechselstrom. Als Strom wechselnder Stärke und Richtung induziert der Wechselstrom unmittelbar. Eine Transformation auf höhere Spannung kann also ohne weiteres in jedem technischen Transformator (ohne Unterbrecher) ausgeführt werden. Der Transformator unterscheidet sich vom Funkeninduktor dann nur durch seinen geschlossenen Eisenkern. Zweifellos käme eine derartige unterbrecherlose Anlage dem Ideal nahe, wenn nun nicht der Wechselstrom wegen seines symmetrischen Spannungsverlaufes für den Röntgenbetrieb unbrauchbar wäre. Die Röntgenröhre verlangt Stromdurchgang nur in einer Richtung. Steht für die Anlage nur Wechselstrom zur Verfügung, so muß man ihn entweder durch ein rotierendes Aggregat (Wechselstrommotor mit Gleichstromdynamomaschine gekuppelt) in Gleichstrom verwandeln und dann wie unter 4 verfahren oder auf irgendeine Art die eine der beiden Wechselstromphasen dauernd unterdrücken. Ein derartiger unmittelbarer Gleichrichterbetrieb (im Gegensatz zum mittelbaren Umformerbetrieb) kann nach verschiedenen Prinzipien erreicht werden.

a) mit Synchronunterbrecher. Durch einen vom Wechselstrom gespeisten Synchronmotor wird einer der bereits bekannten Unterbrecher betrieben und die Konstruktionsverhältnisse werden so gewählt, daß die Unterbrechung nur im Gipfelpunkt der einen Phase erfolgt. Dies System gilt für veraltet.

b) mit elektrolytischen Zellen. Durch eine elektrolytische Zelle, in der sich als Elektrolyt z. B. doppelt basisches Ammoniumphosphat und als Elektroden Aluminium und Blei befinden, geht der Strom nur vom Blei zum Aluminium, während umgekehrt durch Bildung einer Oxydschicht auf dem Aluminium eine Drosselwirkung bis zu etwa 100 Volt Spannung stattfindet (L. Graetz, 1895). Derartige Zellen in den Wechselstromkreis geschaltet, scheiden also die eine Phasenreihe aus und machen aus dem Wechselstrom einen ruckweise fließenden pulsierenden Gleichstrom. Beide Phasen lassen sich durch Gegenschaltung von 4 Zellen nach Art einer Wheatstoneschen Brücke ausnutzen.

c) durch eine Hilfswickelung im Transformator. Zwischen Primär- und Sekundärwickelung besitzt der Transformator eine dritte Wickelung, in der die eine induzierte Phase durch eine Drosselvorrichtung unterdrückt wird. Nur während dieser geht dann Energie auf die Sekundärspule über.

d) durch Hochspannungskommutator. Eine gleichtaktig (synchron) mit dem Wechselstrom betriebene, rotierende Vorrichtung sorgt dafür, daß die eine Hochspannungsphase unverändert zur Röhre gelangt, während die andere in der Richtung umgekehrt wird. Der Hochspannungskommutator ist also zwischen der Sekundärspule des Induktors (bezw. technischen Hochspannungstransformators) und der Röntgenröhre eingeschaltet. Wegen der hohen Spannungen müssen seine Teile weite Abmessungen haben und vorzüglich isoliert sein; auch dürfen alle Massen nur gering sein, da wegen der hohen Tourenzahl (meist 50 Umdrehungen in der Sekunde) die Beanspruchung durch die Zentrifugalkräfte sehr groß ist.

Hochspannungskommutatoren sind für den Wechselstrombetrieb vielfach eingeführt. Wenn man sich über eine rasche Abnutzung des Röhrenmaterials beklagt hat, so liegt das nicht am System, sondern daran, daß sich sinusförmiger Wechselstrom (auch der Hochspannungsstrom ist natürlich sinusförmig) für Röntgenröhren überhaupt schlecht eignet.

7. Röntgendynamomaschinen. Da der unterbrecherlose Betrieb, also der direkte Betrieb mit Wechselstrom, an sich fraglos technische Vorteile besitzt, andererseits jedoch die sinusförmige Kurvenform des Wechselstromes für Röntgenröhren ungünstig ist — es geht dabei relativ zu viel Energie in Wärme über — hat man versucht besondere Wechselstromdynamomaschinen, d. h. Wechselstrommaschinen zu konstruieren, die einen unsymmetrischen Strom liefern. Die eine Phase ist von geringer Spannung, die andere von relativ hoher, die Kurvenform dieser Phase ist nicht sinusförmig, sondern spitz emporgezogen. Wo viele Röntgeneinrichtungen im Betriebe sind, also in großen Krankenhäusern, kann man eine derartige Maschine aufstellen, die dann ihren charakteristischen Strom in ein Leitungsnetz liefert, an das ohne Zwischenapparate (außer den Regulierwiderständen) die Hochspannungstransformatoren unmittelbar angeschlossen werden können (Boas 1911). Eine derart zentralisierte Erzeugung von „Röntgenstrom" würde den ganzen Betrieb vorteilhaft vereinfachen. Die Maschinen befinden sich jedoch zurzeit noch im Versuchsstadium.

8. Die Röntgenröhren. Unter den Anforderungen der Technik und dem Einfluß der Erfahrungen, die man damit gemacht hat, haben die Röntgenröhren mannigfache Veränderungen erfahren. Nachdem man weiß, welchen Einfluß die in ihnen noch vorhandenen Gasreste haben, wurde allgemein der Rauminhalt wesentlich vergrößert. Nimmt man an, daß ein Kubikzentimeter atmosphärischer Luft 10^{19} Moleküle enthält und daß der Druck in der Röhre $^1/_{1000000}$ Atmosphärendruck ist, so würden auch in der best evakuierten Röhre auf dieselbe Volumeneinheit immer noch 10^{13} Moleküle kommen; sie können nicht ohne Bedeutung sein.

Es sei ferner vorausgeschickt, daß unter sonst gleichen Konstruktionsverhältnissen das zur Entladung erforderliche elektrische Potential mit abnehmendem Gasdruck in der Röhre wächst. Da gleichzeitig (mit wachsender „Härte" wie der Techniker sagt) die Kathodenstrahlgeschwindigkeit zunimmt, verlegt sich der Schwerpunkt der im Röntgenstrahlenbündel enthaltenen kontinuierlichen Strahlen nach den kürzeren Impulsen. Je höher das Vakuum (je größer die „Härte" der Röhre ist), desto durchdringungsfähiger sind also die von ihr erzeugten Röntgenstrahlen. Während sehr weiche Röhren im Bilde keine Schattenkontraste liefern, da die weniger dichten Teile (z. B. das Muskelfleisch) noch nicht genügend durchdrungen werden, wächst der Kontrast mit zunehmender Härte, um früher oder später, je nach den Dichtigkeitsverhältnissen des durchstrahlten Körpers, ein Maximum zu erreichen. Mit weiter zunehmender Härte nimmt dann der Kontrast wieder ab, weil auch die dichteren Teile (z. B. Knochen) stark durchstrahlt werden.

Röhren von bestimmtem Härtegrade lassen sich im Betriebe auf die Dauer nicht halten, da der Gasdruck in ihnen einer ständigen Veränderung unterworfen ist, in den weitaus meisten Fällen mit der Neigung zum Sinken. Die Röhren werden im Gebrauch fast ausschließlich härter, und zwar infolge einer Zerstäubung der Metallteile, namentlich des Platins, das die Eigenschaft hat, Gasteile zu adsorbieren. Besonders die Antikathode muß also vor Erwärmung, die aus der Umwandlung der Kathodenstrahlenenergie herrührt, und namentlich vor Glühhitze, bei der die Zerstäubung sehr heftig erfolgt, bewahrt werden. Die neueren Röntgenröhren sind daher alle mit Vorrichtungen zur Ableitung der an der Antikathode erzeugten Wärme versehen. Wir können folgende Haupttypen unterscheiden:

a) Antikathoden mit hinterlegtem Platin (Fig. 9 I). Ein starker Kupferblock und ein Kupferrohr Cu hinter dem Platinblech Pt sorgen für Verteilung der Wärme. Bei der großen Wärmekapazität des Kupfers steigt die Temperatur daher nur langsam.

b) Antikathoden mit Innenkühlung durch Kupferrippen (Fig. 9 II). Die Abfuhr der Wärme erfolgt durch Strahlung.

c) Antikathoden mit Außenkühlung (Fig. 9 III). Die Wärme wird durch einen starken Kupferdraht nach außen geleitet und durch einen Rippenkörper R ausgestrahlt bezw. an die Luft durch Mitteilung abgegeben.

d) Antikathoden mit Wasserkühlung (Fig 9 IV). Die Antikathode bildet den Boden einer mit Wasser gefüllten, außen mit einer kugeligen Erweiterung versehenen Glasröhre. Die Wärme geht unmittelbar an das Wasser über.

„Schließungslicht" in der Röhre. Jede Vakuumröhre, in der sich Anode und Kathode in sehr verschiedener Lage der Glaswand gegenüber befinden, also auch die Röntgen-

röhre, besitzt eine ausgesprochene Drosselwirkung: sie hat die Neigung, den Strom nur in der Richtung von der freier stehenden Anode nach der engumschlossenen Kathode hindurchzulassen, nicht umgekehrt. Die

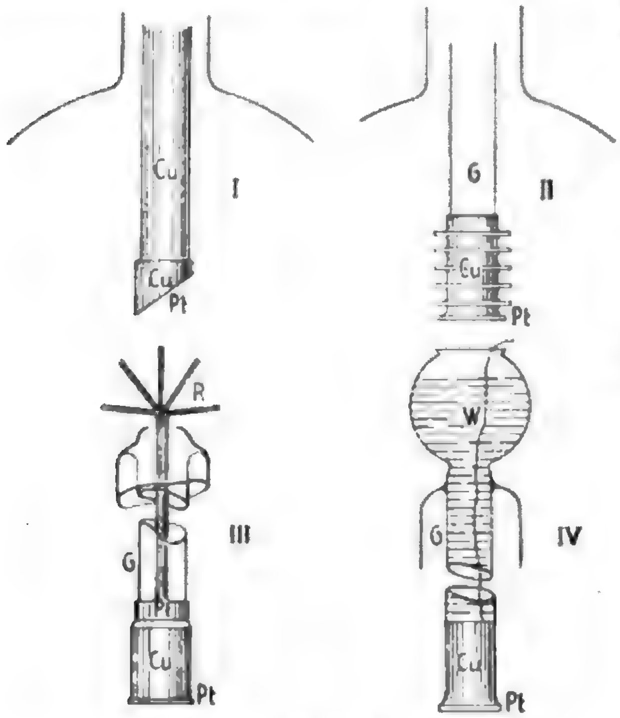


Fig. 9.

mit geringerer Spannung behaftete von der Schließung des Primärstromes herrührende Phase des unsymmetrischen Induktorstromes (vgl. Fig. 6) wird daher meist von selbst unterdrückt. Ist dies nicht der Fall, geht also auch die Stromphase niederer Spannung durch die Röhre, wobei die Anode und die mit ihr leitend verbundene Antikathode zu Kathoden werden, so zeigt die Röhre „Schließungslicht". Sie teilt sich nicht mehr in eine fluoreszierende und eine dunkle Hälfte, sondern erscheint scheckig und zeigt oft auf der Glaswand gegenüber der Antikathode einen Fluoreszenzfleck. Schließungslicht tritt auf, bei schlecht konstruierten Röhren vorzugsweise, wenn bei hoher Betriebsspannung hohe Frequenz des Unterbrechers verlangt wird, infolge des raschen Stromanstieges. Bei reinem, spannungssymmetrischen Wechselstrom bedarf es daher, wie bereits gezeigt wurde, besonderer Vorkehrungen, um die verkehrte Stromrichtung zu unterdrücken. Im Betriebe mit unterbrochenem Gleichstrom hilft man sich bisweilen durch Vorschalten einer besonderen „Ventilröhre" vor die Röntgenröhre. Sie besteht aus einem Vakuumrohr mit zwei Elektroden, von denen die eine frei steht, während die andere im Glashals liegt. Die eng umschlossene Elektrode wird mit der Kathode der Röntgenröhre verbunden.

Eine verkehrte Stromrichtung ist in der Röntgenröhre gefürchtet, weil sie das Platin der Antikathode — die dann Kathode ist — zerstäubt. Das zerstäubende Platin adsorbiert den Gasinhalt und macht die Röhre in kurzer Zeit, unter Umständen bis zur Unbrauchbarkeit, hart. Da auch sonst stets eine geringe Zerstäubung stattfindet — namentlich wenn die sich negativ aufladende Antikathode nicht mit der Anode verbunden wird — so ist die Neigung aller Röhren, im Betrieb härter zu werden, verständlich.

Regenerierungsvorrichtungen. Regenerierungsvorrichtungen, mit denen es möglich ist, Spuren atmosphärischer Luft der härter werdenden Röhre wieder zuzuführen, sind zahlreich konstruiert worden Sie fehlen fast an keiner neueren Röhre. Wir unterscheiden:

a) Palladiumregenerierung. Sie beruht auf der Verwendung eines kleinen, außen geschlossenen Palladiumröhrchens, das in ein weiteres Seitenrohr der Röntgenröhre eingeschmolzen ist. Das Ende des Röhrchens wird in einer Spiritusflamme rotglühend gemacht; hierbei diffundiert Wasserstoff durch das Palladium in die Röntgenröhre.
b) Regenerierung durch Luftabgabe im Vakuum befindlicher Substanzen. Geeignet sind Glimmer, Kohle, Aetzkali usw. Die Stoffe werden in einem Seitenrohr befestigt und geben bei Erhitzung Luft, die sie adsorbiert hatten, an das Vakuum ab. Die Erhitzung erfolgt meist durch Stromdurchgang.
c) Regenerierung durch Zufuhr von Außenluft. Die Vorrichtung (von H. Bauer) ist in Figur 10 schematisch

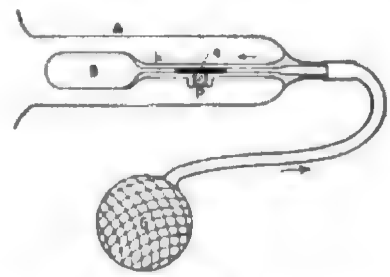


Fig. 10.

dargestellt. In einen Seitenansatz (a) der Röntgenröhre ist eine Kapillare mit einer Erweiterung B luftdicht eingeschmolzen. Ein Ansatz P der Kapillare enthält eine feste aber poröse Substanz, die durch einen Quecksilberfaden q verdeckt wird. Bläst man durch einen Gummiball G Luft ein, so verschiebt sich der Quecksilberfaden und gibt P frei. Es diffundiert dann Luft in die Röntgenröhre. Bei Nachlassen des

Druckes auf den Ball, dehnt sich das in B zusammengepreßte Luftpolster aus und schiebt das Quecksilber wieder vor den porösen Pfropfen. Neuere Ausführungen dieser Regenerierung verhindern den Eintritt von Quecksilberdämpfen in die Röntgenröhre.

Bestimmung des Härtegrades. Die Bestimmung des Härtegrades der Röhre erfolgt zweckmäßig durch eine parallel geschaltete Funkenstrecke. Die Elektroden werden soweit zusammengeschoben bis Funkenbildung erfolgt; die Länge der Funkenstrecke wächst mit dem Härtegrad der Röhre.

Auch durch Beobachtung des Schattenwurfes der Hand auf dem Leuchtschirm läßt sich der Härtegrad beurteilen. Weiche Röhren geben dunkle Gesamtschatten, mittelweiche helle Fluoreszenz und große Kontraste, harte durchscheinige, flaue Bilder.

Eine Vergleichsmessung ist ferner möglich mit dem Radiometer von Walter, das eine Reihe von Löchern enthält, die mit dünnen Platinblechen von jedesmal auf das Doppelte wachsender Stärke abgedeckt sind. Beobachtet wird die Strahlungsintensität hinter den Blechen auf einem Leuchtschirm. Bei dem Radiometer von Benoist-Walter sind in der Stärke geometrisch zunehmende Stufen von Aluminium rings um ein Silberblech angeordnet. Je dicker die Stufe ist, die mit dem Silberfeld vor dem Leuchtschirm gleiche Helligkeit zeigt, desto härter ist die Röhre.

Das jetzt meist benutzte Radiometer von Wehnelt vergleicht die Durchlässigkeit eines Silberbleches mit derjenigen eines logarithmisch geschweiften Aluminiumkeiles, der sich zusammen mit dem Silberblech vor einem Beobachtungsspalt verschieben läßt. Je größer die auf einer Skala ablesbare Verschiebung ist, je stärker also der Al-Keil, der an spezifischer Durchlässigkeit dem Silberblech gleichkommt, desto größer ist die Härte. Die beiden letztgenannten Radiometer sind in ihren Angaben unabhängig vom Röhrenabstand.

9. Radioskopie. Wir verstehen darunter die visuelle Beobachtung des Fluorenszenzbildes. Das im Schattenwurf erscheinende Objekt tritt zwischen die Röhre und den Fluoreszenzschirm.

Als fluoreszierende Substanz wird für visuelle Wahrnehmung ausschließlich das Baryumplatincyanür benutzt. Seine Fluoreszenzfarbe ist grün bis grüngelb. Wolframsaures Calcium fluoresziert blau, weniger kräftig, eignet sich aber vorzugsweise für photographische Wirkung (siehe 10 „Radiographie").

Um seitlich auffallende und die Beobachtung störende Lichtstrahlen fernzuhalten und um überhaupt auch bei Licht untersuchen zu können, befestigt man am Leuchtschirm einen Papptrichter mit einer oberen Schauöffnung (Kryptoskop). Es sind ferner für die Zwecke der Radioskopie Beobachtungsgestelle und Tische konstruiert worden, bei denen ein vertikal oder horizontal beweglicher Leuchtschirm eine Untersuchung des Objektes in aufrechter oder liegender Stellung gestattet.

10. Radiographie. An Stelle des Leuchtschirmes tritt die photographische Platte in einer lichtdichten Kassette. Da sich hinter den dichteren Stellen die Platte nach der Entwickelung weniger geschwärzt zeigt als hinter weniger dichten, ergibt sich ein Bild, das im Positiv dem Schattenbild auf dem Leuchtschirm vollkommen entspricht. Die photographische Methode ist jedoch der visuellen Beobachtung insofern überlegen, als sie gestattet, durch Anwendung längerer Expositionszeiten auch bei undurchlässigeren Körperteilen mittelweiche und daher kontrastgebende Röhren anzuwenden, deren Strahlen für eine direkte Beobachtung auf dem Leuchtschirm nicht durchdringend genug wären. Bezüglich der photographischen Technik muß auf die Fachliteratur verwiesen werden.

Eine wesentliche Abkürzung der Expositionszeit kann durch Verstärkungsschirme erzielt werden, das sind Folien mit einem Ueberzug einer blau fluoreszierenden Substanz (z. B. wolframsaurem Calcium). Man bringt sie mit der Plattenschicht in innige Berührung, so daß sie dabei der Röntgenröhre zugewendet ist. Zu der nur wenig geschwächten Wirkung der Röntgenstrahlen addiert sich dann noch diejenige des Fluoreszenzlichtes. Bedingung ist ein sehr feines Korn der Leuchtschicht (Gehler-Folie).

Durch Parallelverschiebung der Röhre um einen Betrag, der mit dem Röhrenabstand von der Platte entsprechend wachsen muß, können nacheinander zwei Aufnahmen gemacht werden, die in einem geeigneten Betrachtungsapparat vereinigt, ein Bild von stereoskopischer Wirkung ergeben.

Ueber alle Zubehörteile zur Radiographie: Kassetten, Gestelle, Aufnahmetische usw. gibt die technische Literatur Auskunft.

11. Blendentechnik. In jedem von Röntgenstrahlen getroffenen Körper entwickeln sich sekundäre Röntgenstrahlen (vgl. A, 4), die unter Umständen bei einer photographischen Aufnahme sehr störend wirken können, da sie den schattengebenden Gegenstand (z. B. den Knocheneinschluß im Muskelfleisch) gewissermaßen unterspülen und das Bild verschleiern. Die sekundäre Strahlung der von Röntgenstrahlen durchsetzten Wand der Röhre — die sogenannten „Glas-

strahlen" —, aber auch die zerstreuten Strahlen der Kassette, des Aufnahmetisches usf., können verschleiernd einwirken. Man blendet daher durch besondere, nach allen Seiten verstellbare und mit Bleiblech ausgeschlagene Kastenblenden, in denen die Röntgenröhre zentrisch aufgestellt wird, alle Randstrahlen, soweit es die Beobachtung zuläßt, ab. Zugleich schützt man den Arzt dadurch gegen schädigende Strahlenwirkung. Die Blendenkonstruktionen sind sehr verschiedenartig. Erwähnt sei hier besonders die Kompressionsblende von Albers-Schönberg, da sie neben den überflüssigen Randstrahlen zugleich die Einwirkung der Glasstrahlen größtenteils beseitigt (Fig. 11). B ist eine Blende mit einem Ansatzrohr R; beide aus undurchlässigem Material. Man erkennt sofort, daß bereits die von den Glasstellen a und b herrührenden sekundären Strahlen den aufzunehmenden Körper K nicht mehr treffen können. Durch Herabdrücken des Röhren- und Blendengestells auf den Patienten wird gleichzeitig eine Kompression ausgeübt. Es ist selbstverständlich, daß Antikathoden, Blende und Aufnahmeobjekt genau aufeinander ausgerichtet sein müssen.

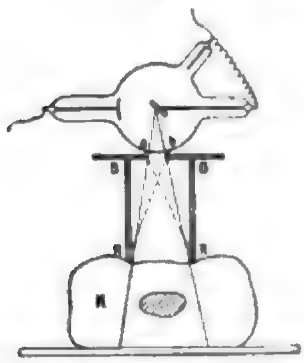


Fig. 11.

12. Meßkunde. Infolge der Kegelprojektion ist der Schattenwurf des beobachteten Körpers stets größer als dieser selbst. Ist a der Abstand des Gegenstandes, b der Abstand des Schattens von der Antikathode, G die Größe des Gegenstandes, so ergibt sich die Größe des Schattens S aus

$$S = G\frac{b}{a}$$

Nur unter Berücksichtigung der Abstandsverhältnisse kann also auf die Größe des schattenwerfenden Körpers geschlossen werden, außer wenn man nach der Methode der orthodiagonalen Beobachtung verfährt (Donath, 1899). Das Prinzip dieser Meßmethode ist folgendes. Die Röntgenröhre (R) ist starr mit einem Index I_1 verbunden, der sich vor der Beobachtungsfläche bewegt. Durch Parallelverschiebung (Fig. 12) der Röhre und des Index wird erst der rechte und dann der linke Schattenrand des zu messenden Körpers d mit dem Index zur Deckung gebracht. d' ist dann gleich d. Da der zur Beobachtung benutzte — den Index treffende — Strahl stets senkrecht auf der Beobachtungsfläche steht, bezeichnet man ihn als den „orthodiagonalen". Orthodiagraphen, namentlich zur Bestimmung der Herzgröße, sind zuerst von Moritz (1900) konstruiert worden.

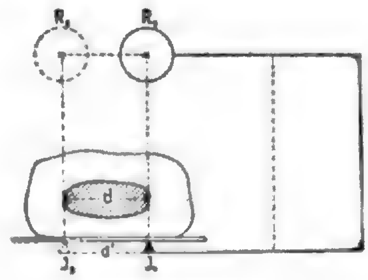


Fig. 12.

Die Entfernung eines Körpers von der Beobachtungsfläche wird am einfachsten durch parallaktische Verschiebung gefunden (Rosenthal 1899). Wird die Röntgenröhre R (Fig. 13) parallel zur Beobachtungsfläche L um die Strecke a verschoben, so wandert der Schatten des Körpers K gegenläufig um die Strecke b. Ist der Abstand der Antikathode von der Beobachtungsfläche d, so ergibt sich der „Tiefensitz" X des Körpers aus der Aehnlichkeit der Dreiecke:

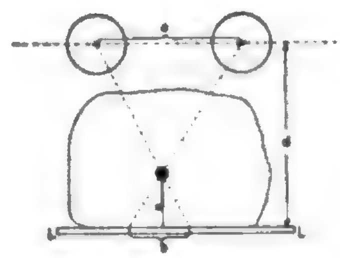


Fig. 13.

$$X = \frac{b \cdot d}{a + b}$$

Im übrigen können stets nur zwei, möglichst in senkrecht zueinander liegenden Ebenen ausgeführte Beobachtungen Aufschluß über die wahre Lage schattenwerfender Körper zueinander bringen. Bei der Beurteilung von Knochenbrüchen namentlich ist diese Beobachtungsmethode unerläßlich.

13. Fernaufnahmen. Je mehr a in der Vergrößerungsformel $S = G\frac{b}{a}$ (Abschnitt 12) wächst, desto mehr nähert sich S der Größe von G, d. h. je weiter die Röntgenröhre vom Objekt und dem Beobachtungsschirm entfernt ist, desto mehr entsprechen Objekt und Schatten einander an Größe. Bei 2 bis 3 m Entfernung kann man, kleinere Objekte vorausgesetzt, beide praktisch einander bereits gleichsetzen. Durch Fernaufnahmen werden

die umständlichen Messungen mit dem Orthodiagraphen unter Umständen überflüssig, falls es gelingt, auch dann noch — z. B. bei Darstellung des Herzens — die Exposition in genügend kurzer Zeit (Bruchteil einer Sekunde) zu vollenden. Nur sehr starke Röntgenanlagen reichen dazu aus. Verstärkungsschirme für die Platten sind dabei unerläßlich.

14. Momentaufnahmen und kinematographische Aufnahmen. Die Ansprüche an Augenblicksaufnahmen sind in der Röntgentechnik begreiflicherweise nicht so groß, wie sonst in der photographischen Praxis. Bei der relativen Bewegungsträgheit der Röntgenobjekte pflegt man Aufnahmen in weniger als $^1/_5$ Sekunde bereits als Momentaufnahmen zu bezeichnen. Es ist jedoch neuerdings gelungen, Aufnahmen des Herzens in weniger als $^1/_{100}$, Aufnahmen von Magen und Darm — die durch Wismutinjektionen oder einen Brei von Speise und Magneteisenstein vorher undurchlässig zu machen sind — in weniger als $^1/_{10}$ Sekunde mit sehr kräftigen Induktoren herzustellen. Der Stromschluß erfolgt dabei durch einen besonderen Momentschalter oder die einmalige Unterbrechung durch eine Sicherungspatrone, die sofort nach Einschaltung des Primärstromes durchbrennt.

Kinematographische Aufnahmen direkt auf einem Film, etwa nach dem leuchtenden Bilde des blau fluoreszierenden Leuchtschirmes, sind bisher mit ausreichendem Erfolg nicht gemacht worden, da das Fluoreszenzbild zu lichtschwach ist, um danach die genügende Anzahl Filmbilder (mindestens 15 in der Sekunde) anzufertigen. Man hat sich bisher begnügen müssen, eine Reihe rasch hintereinander angefertigter oder nach dem zeitlichen Verlauf des Vorganges zusammengestellter Platten verkleinert auf einem Filmstreifen zu kopieren.

15. Dosierung der Strahlungsenergie. Für die Röntgentherapie ist es wichtig, die dem Patienten zugeführten Strahlungsenergien messen und vergleichen zu können. Nach dem Vorgange von Holzknecht beobachten Sabouraud und Noiré während der Bestrahlung die Farbenänderung des Bariumplatincyanürs im Vergleich mit einer festen Farbenskala, Kienböck die Schwärzung des Bromsilberpapiers, das er neben dem bestrahlten Körper exponiert, wobei er berücksichtigt, daß die Strahlungsintensität J′ seitlich mit dem Kosinus des Einfallswinkels zu und mit dem Quadrat der Entfernung von der Antikathode abnimmt.

$$J' = J\frac{\cos\alpha}{r^2}$$

Neuerdings schaltet man mehrfach ein Drehspulenmilliampèremeter in die nach der Röntgenröhre führende Hochspannungsleitung ein, das die mittleren Stromstärken der Phasen angibt. Da das Produkt

$$i.t = Q$$

die geförderte Elektrizitätsmenge darstellt, genügt es für die Dosierung, Stromstärke und Bestrahlungszeit zu notieren. Verwickelt werden die Verhältnisse jedoch, wenn die Härte der Röhre berücksichtigt werden soll.

C. Aerztliche Röntgenpraxis.

Die ärztliche Röntgenpraxis kann hier nur andeutungsweise besprochen werden. Es steht eine überreiche Literatur zur Verfügung. Referate und Originalarbeiten findet man vorzugsweise in den „Fortschritten auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen".

a) Diagnose. Die Röntgenstrahlen werden mit Erfolg angewandt zum Nachweis von Schädelhöhlenvereiterungen, Herzerweiterung und Verlagerung, Erkrankung der Hauptgefäße, Tuberkulose (die befallenen Lungenteile erscheinen dunkel), Erkrankung der Bronchien, Erweiterung der Cavernen (durch Perkussion nicht festzustellen), Magenerkrankungen (u. a. Karzinome und Sarkome), Gelenkerkrankungen (Tuberkulose), Arteriosklerose (Verkalkung), Knochenbrüchen und Erkrankungen der Knochen usw.

b) Therapie. Erfolge durch Bestrahlungen sind erzielt u. a. bei Psoriasis (Schuppenflechte), Eczemen (Hautausschlägen), Furunkulose (Blutgeschwüren), Tumoren (Geschwülsten), syphilitischen Ausschlägen, Favus (Kopfgrint), Leukämie (Weißblütigkeit), Struma (Kropfgeschwulst), Bronchitis, venerischen Bubonen, Sarkomen innerer Organe, Myoma uteri (Muskelgeschwulst der Gebärmutter) usw.

Literatur. *Zu* **A: W. C. Röntgen,** *Wied. Ann.* **64,** *1, 12, 18, 1898.* — **Ch. G. Barkla,** *Jahrb. d. Radioaktivität u. Elektronik* **5,** *246, 1908;* **6,** *1, 1910. Nature 17. March 1904, 9. March 1905; Phil. Trans.* **24,** *467, 1905; Proc. Roy. Soc.* **74,** *474, 1905;* **77,** *247, 1906.* — **H. Haga,** *Ann. d. Phys.* **23,** *439, 1907.* — **E. Wiechert,** *Wied. Ann.* **69,** *739, 1899.* — **E. Marx,** *Verh. d. D. Phys. Ges.* **7,** *302, 1905;* **10,** *117, 1908; Phys. Zeitschr.* **6,** *768, 1905;* **9,** *731, 1908;* **11,** *952, 1910; Ann. d. Phys.* **20,** *677, 1906;* **28,** *37, 153, 1909;* **33,** *1305, 1910;* **35,** *397, 1911.* — **J. Franck und R. Pohl,** *Verh. d. D. Phys. Ges.* **10,** *117, 489, 1908; Ann. d. Phys.* **34,** *936, 1911.* — **H. W. Bragg** *(betreffend Korpuskulartheorie der Röntgenstrahlen), Phil. Mag.* **14,** *429, 1907; Nature* **76,** *661, 1907;* **78,** *270, 560, 1908;* **78,** *271, 293, 1908.* — **Ch. G. Barkla** *(betreffend Korpuskulartheorie der Röntgenstrahlen) Nature* **76,** *661, 1907;* **77,** *319, 1908;* **78,** *7, 1908.* — **Benoist** *(betreffend selektive Absorption der Röntgenstrahlen), Journ. de Phys.* **10,** *653, 1901.* — **H. Haga** *(betreffend selektive Absorption), Ann. d. Phys.* **23,** *445, 1907.* — **Ch. A. Barkla,** *Jahrb. d. Rad. u. El.* **5,** *246, 1908; Proc. Cambr. Soc.* **15,** *257, 1909; Phil. Mag.* **20,** *370, 1910.* — **Ch. G. Barkla und J. Nicol,** *Nature* **84,** *139, 1910.* —

E. Wiechert *(betreffend Entstehung der Röntgenstrahlen), Abh. d. phys.-ök. Ges. in Königsberg 1896; Wied. Ann.* **59**, *283, 1896.* — **G. G. Stokes** *(betreffend Entstehung der Röntgenstrahlen), Proc. Cambr. Soc.* **9**, *215, 1896.* — **J. Cr. Chapman** *(betreffend linienhafte Strahlung), Phil. Mag.* **21**, *446, 1911.* — **J. Stark** *(Hypothese über die Emission die selektiven Röntgen-Strahlung), Phys. Zeitschr.* **10**, *579, 1919; Die Prinzipien der Atomdynamik II. (Vollständige Behandlung des Gegenstandes).* — **R. Whiddington,** *Proc. Cambr. Soc.* **15**, *574, 1910;* **16**, *150, 1911; Proc. Roy. Soc.* **85**, *99, 323, 1911.* — **W. Wien,** *Gött. Nachr. 1907, S. 598.* — **Ch. W. Barkla** *(Polarisation der primären Strahlung), Phil. Trans.* **204**, *467, 1905.* — **J. Stark** *(Dissymmetrie der zentralen Strahlung), Phys. Zeitschr.* **10**, *902, 1909;* **11**, *107, 1910.* — **E. Dorn** *(Emission sekundärer Kathodenstrahlen), Abhandl. d. Naturf. Ges. Halle* **22**, *39, 1900; Arch. Neerl.* **5**, *595, 1900.* — **A. Bestelmeyer** *(Emission sekundärer Kathodenstrahlen), Ann. d. Phys.* **22**, *429, 1907.* — **W. Wien** *(sekundäre Kathodenstrahlen), Gött. Nachr. 1907, S. 598.* — **J. Laub** *(sekundäre Kathodenstrahlen), Ann. d. Phys.* **26**, *712, 1908.* — **W. Seitz** *(sekundäre Kathodenstrahlen), Phys. Zeitschr.* **11**, *705, 1910.* — **J. Stark,** *Phys. Zeitschr.* **8**, *88c, 1907.* — **Ch. D. Cooksey** *(Verteilung sekundärer Kathodenstrahlen), Nature* **77**, *509, 1908.* — **W. Wien** *(thermischer Effekt der Röntgenstrahlen), Ann. d. Phys.* **18**, *991, 1905.* — **E. Dorn** *(thermischer Effekt der Röntgenstrahlen), Wied. Ann.* **63**, *160, 1897; Phys. Zeitschr.* **2**, *218, 1900.* — **Ch. G. Barkla,** *Phil. Mag.* **7**, *543, 1906;* **7**, *812, 1906.* — **J. A. Crowther** *(Verteilung der zentralen Strahlung) Proc. Roy. Soc.* **85**, *29, 1911; Proc. Cambr. Soc.* **16**, *112, 177, 188, 1911.* — **E. A. Owen** *(Verteilung der zentralen Strahlung), Proc. Cambr. Soc.* **16**, *161, 1911.* — **L. Fomm** *(und folgende: Beugung der Röntgenstrahlen), Wied. Ann.* **59**, *350, 1896.* — **H. Haga und C. H. Wind.** *Wied. Ann.* **68**, *884, 1899; Ann. d. Phys.* **10**, *305, 1903.* — **P. Walter und R. Pohl,** *Ann. d. Phys.* **25**, *715, 1908;* **29**, *331, 1909.* — **W. Friedrichs, P. Knipping, M. Laue,** *Interferenz der Röntgenstrahlen. Sitzungsber. der Bayerischen Akad. d. Wiss. 1912.*

Zu B: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen. Herausgegeben von Albers-Schönberg. — **Albers und Schönberg,** *Die Röntgentechnik, III. Aufl., Hamburg.* — **E. Sommer,** *Röntgentaschenbuch, Leipzig.* — **Gocht,** *Handbuch der Röntgenlehre.* — **B. Donath,** *Die Einrichtungen zur Erzeugung der Röntgenstrahlen, Leipzig.*

Zu **C: K. Reifferscheid,** *Die Röntgentherapie in der Gynäkologie, Leipzig.* — **H. E. Schmidt,** *Kompendium der Röntgentherapie, Berlin.* — **F. Schultz,** *Die Röntgentherapie in der Dermatologie, Berlin.* — **A. Köhler,** *Das Röntgenverfahren in der Chirurgie.* — **Rudolf Gashey,** *Atlas typischer Röntgenbilder.*

B. Donath.

Roozeboom

Hendrik Willem Bakhuis.

Geboren am 26. Oktober 1854 in Alkmaar, Nord-Holland, gestorben am 7. Februar 1907 in Amsterdam. Er stammte aus einfachen Verhältnissen, war von 1874 an in einer chemischen Fabrik tätig, wurde 1878 Assistent am chemischen Institut in Leiden, 1890 Lektor und 1896 Professor der anorganischen und physikalischen Chemie an der Universität Amsterdam. Roozeboom ist vor allem durch systematische Anwendung der Phasenlehre auf chemische Gleichgewichte hervorgetreten.

Literatur. *Berichte der Deutschen Chemischen Ges. 1907, S. 5141; Rec. trav. chim.* **22**, *S. 360, 1903.*

E. Drude.

Rose

Gustav.

Geboren am 18. März 1798 zu Berlin; gestorben am 15. Juli 1873 ebenda. Er war ein Bruder des Chemikers Heinrich Rose. Nachdem er 1815 am Feldzug teilgenommen hatte, studierte er in Berlin zunächst das Bergfach und war auch in Königshütte bei Tarnowitz als Bergeleve tätig. Krankheit zwang ihn aber, sich der akademischen Laufbahn zuzuwenden. Er promovierte 1820, arbeitete dann bei Berzelius in Stockholm und wurde 1823 Dozent in Berlin. Nach einer Reise nach Frankreich und England wurde er 1826 zum außerordentlichen Professor ernannt. 1829 unternahm er mit A. v. Humboldt und Ehrenberg eine Reise nach Asien, wurde 1834 zum Mitglied der Akademie, 1839 zum Ordinarius und 1856 zum Direktor des Mineralogischen Museums ernannt. 1850 reiste er mit seinem Freunde E. Mitscherlich an den Vesuv, Aetna und nach den liparischen Inseln, 1852 in die Auvergne.

Auf Mitscherlichs Entdeckung des Isomorphismus hat Rose wesentlichen Einfluß gehabt. Seiner scharfen Beobachtung und seiner Meisterschaft im Messen und Zeichnen von Kristallen sind eine Reihe wertvoller kristallographischer Untersuchungen zu verdanken. Er schrieb auch „Elemente der Kristallographie" (1830) und „Das kristallochemische Mineralsystem" (1852). Außerdem ist seine „Mineralogisch-geognostische Reise nach dem Ural, dem Altai und dem kaspischen Meere" von bleibendem Werte (1837 und 1842). Neben Untersuchungen über Meteoriten, über Augit und Hornblende, über das Kristallisationssystem des Quarzes, über den Zusammenhang zwischen Kristallform und elektrischer Polarität sind seine Arbeiten über die heteromorphen Zustände der kohlensauren Kalkerde sehr bekannt geworden. Die Petrographie verdankt ihm außer der Beschreibung der Mineralzusammensetzung und der Klassifikation einer großen Zahl von Gesteinen „Versuche über die Umwandlung dichter Kalksteine in kristallinisch-körnigen Marmor". Mit Beyrich, Roth, Runge beteiligte er sich an den Aufnahmen zur geognostischen Karte von Schlesien.

Literatur. *K. F. Rammelsberg, Nekrolog in der Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaften, Bd. XXV, 1873. — G. v. Rath in Poggendorffs Annalen* **150**.

K. Spangenberg.

Rose
Heinrich.

Geboren am 6. August 1795, gestorben am 27. Januar 1864 zu Berlin, entstammte einer angesehenen Apothekerfamilie Berlins, war auch selbst zuerst Pharmazeut, dann durch den unmittelbaren Einfluß von Berzelius der reinen Chemie ergeben, die er als hervorragender Analytiker durch meisterhafte Untersuchungen im Gebiete der anorganischen und mineralogischen Forschung bereicherte. Seit 1822 Dozent an der Berliner Universität, hat er dieser bis zu seinem Tode angehört. Sein zuerst 1829 erschienenes mustergültiges Handbuch der analytischen Chemie ist in zahlreichen Auflagen, auch nach seinem Tode neu bearbeitet, erschienen. Seine meist in Poggendorffs Annalen, zum Teil auch in den Berliner Akademieschriften veröffentlichten Einzeluntersuchungen sind durch Zuverlässigkeit und Schärfe der Beobachtungen ausgezeichnet; sie betreffen vielfach die seltenen Elemente und ihre Verbindungen. Ein Verzeichnis sämtlicher Schriften Roses findet sich in Poggendorffs biographisch literarischem Handwörterbuch Bd. 2, S. 687, und Bd. 3, S. 1141. Von Gelegenheitsschriften ist seine schöne Gedächtnisrede auf Berzelius (Abhandlungen der Berliner Akademie 1851) hervorzuheben.

E. von Meyer.

Rösel von Rosenhof
August Johann.

Geboren am 30. März 1705 zu Augustenburg bei Arnstadt, gestorben am 29. März 1759 in Nürnberg. Er zeigte schon früh lebhaftes Interesse für Naturbeobachtung und Malerei, so daß er zu seinem Vetter Wilhelm Rösel von Rosenhof, der sich namentlich durch seine Tierbilder auszeichnete, in die Lehre kam. Nach Vollendung derselben weilte er kurze Zeit in Augustenburg, um dann die Malerakademie in Nürnberg zu beziehen. Hier pflegte er namentlich die Miniaturmalerei und die Kupferstichkunst. Er fand mit seinen Arbeiten viel Anklang, so daß er ein gutes Auskommen hatte, ja selbst noch eine Reise nach Kopenhagen 1726 erübrigen konnte. Hier bot ihm der Kronprinz von Dänemark eine lebenslängliche Anstellung, die er jedoch ausschlug. — Trotz seiner vielen Aufträge fand er Zeit, um sich seiner ausgesprochenen Liebe zur Naturbeobachtung hinzugeben. Er beschäftigte sich namentlich mit niederen Tieren, Polypen, Würmern und vor allem Insekten, deren Leben und Treiben er mit unermüdlicher Geduld meisterhaft beobachtete. Sein bedeutendstes Werk sind die monatlich herausgegebenen Insektenbelustigungen, von denen drei Teile 1746, 1749 und 1755 erschienen, den vierten Teil gab nach seinem Tode Kleemann 1761 heraus. Das Werk stellt eine wahre Fundgrube für die Lebensgeschichte und die Verwandlung der Insekten dar und bildet noch heute das Entzücken der Naturforscher. Namentlich bieten die naturgetreuen künstlerisch vollendeten Abbildungen immer neuen Genuß. Seine „Historia naturalis ranarum nostratium" bietet zwar wenig Neues gegenüber früheren Bearbeitungen, ist aber trotzdem ein künstlerisches Meisterwerk und läßt auch die kleinsten Details nicht vermissen. Es erschien 1758 mit einer Vorrede von Albert von Haller, lateinisch und deutsch (die lateinische Uebersetzung von Dr. Huth). Zu einem dritten Werke über die Eidechsen waren die Tafeln bereits fertig, der Tod hinderte jedoch die Herausgabe. — Rösel hat die Kenntnis vom Leben der Tiere wesentlich gefördert. Er ist nach Carus eine jener gemütlichen Naturen, die glücklich in der Beobachtung der umgebenden Natur sind und die mit ausdauernder Geduld und ganzer Liebe bescheiden und naiv immer weitere Belege für die Weisheit der Naturordnung und deren Schöpfer vorführen.

Literatur. *Biographie von* **Kleemann** *im vierten Teil der Insektenbelustigung. — Allgemeine deutsche Biographie, Bd.* **29**, *1889. — Carus, Geschichte der Zoologie. München 1872.*

W. Harms.

Rotatoria.

1. Die Klasse Rotatoria. 2. Aeußere Morphologie. 3. Anatomie: a) Körperdecke. b) Räderorgan. c) Verdauungsapparat. d) Exkretionssystem. e) Geschlechtsorgane. f) Nervensystem und Sinnesorgane. g) Muskelsystem und Bindegewebe. h) Drüsen. 4. Die männlichen Rotatorien. 5. Physiologie: a) Bewegung. b) Nahrungsaufnahme. c) Atmung. 6. Fortpflanzung und Entwickelung. 7. Geographische Verbreitung. 8. Vorkommen und Biologie: a) Süßwasser (Temporal- und Lokalvariation). b) Erdrotatorien. c) Meer. d) Parasitische Rotatorien. 9. System.

1. Die Klasse Rotatoria. Die Rädertiere, Rotatoria oder Rotifera, bilden eine sehr artenreiche und vielgestaltige Gruppe mikroskopischer Würmer, deren systematische Stellung lange schwankend geblieben ist. In einzelnen Vertretern bereits dem Vater der Mikroskopie A. van Leeuwenhoek (1703) bekannt, wurden sie bis weit in das 19. Jahrhundert hinein meist dem Heer der „Infusorien" eingereiht. Auch Ehrenberg behandelte sie 1838 in seinem klassischen Werke noch als „Infusionstierchen", schied sie aber als besondere Klasse Rotatoria scharf von seinen „Polygastrica", den eigentlichen Infusorien. Die Zugehörigkeit zu den Würmern hatte schon vorher (1832) F. A. Wiegmann erkannt und 1851 wies Huxley auf die Aehnlichkeiten hin, welche die Rotatorien mit den Larven der Anneliden,

Mollusken und Echinodermen aufweisen. Diese Auffassung der Rädertiere als phylogenetisch primitiver Formen im Stamme der Würmer gewann in der Folge immer mehr an Boden, als Semper 1872 in der Gattung Trochosphaera ein Rotator kennen lehrte, welches in Gestalt und Organisation den Bauplan der freischwimmenden Trochophora-Larve, wie sie im Entwickelungsgang der marinen Anneliden, Mollusken und Bryozoen usw. auftritt, besonders treu bewahrt zu haben schien. Versuche, die Rotatorien als „Wimperkrebse" den Arthropoden, speziell den niederen Krustaceen anzugliedern (Milne-Edwards, Burmeister und besonders Leydig), haben wenig Anklang gefunden. Gegenwärtig werden die Rotatorien von turbellarienartigen Vorfahren abgeleitet und, zusammen mit den nah verwandten Gastrotrichen, zu den „niederen" Würmern, speziell zu den Coelhelminthen gestellt, in deren System sie ihren Platz nahe den Nemertinen und Nematoden finden. Ihre Klassendiagnose könnte folgendermaßen lauten:

Meist mikroskopisch kleine, bilateralsymmetrische Würmer, ohne echte Gliederung, von sehr wechselnder Körpergestalt. Vorderende mit retraktilem Räderorgan in Gestalt eines den subventralen Mund kranzförmig umziehenden Cilienapparates. Schlund stets mit chitinösem Kauapparat. Weibliche Geschlechtsorgane meist in Keim- und Dotterstock gesondert. Ausführgänge der Geschlechts- und Exkretionsorgane in den Enddarm (Kloake) mündend; After dorsal. Meist ein ventraler sogenannter Fuß, oft mit zehenartigen Anhängen. Geschlechter getrennt und meist sehr verschieden; Männchen fast stets kleiner, mit verkümmertem Räder- und Verdauungsapparat.

2. Aeußere Morphologie. Die Rädertiere sind fast durchweg mikroskopisch kleine, frei bewegliche oder festsitzende Tiere, deren Körpergröße nur selten 1 mm übersteigt; Kolonien können 5 mm im Durchmesser erreichen. Ihre Gestalt ist außerordentlich verschieden: von fast kugeligen Formen (Trochosphaera, Fig. 6) an finden sich alle Uebergänge zu scheibenartig abgeflachten (Pterodina) einerseits und lang wurmförmig ausgezogenen (Philodiniden, Fig. 8) andererseits. In den meisten Fällen lassen sich am Körper der Rotatorien drei Abschnitte unterscheiden: die Kopfregion mit dem Räderorgan, der Rumpf mit dem Eingeweidesystem und der sogenannte Fuß oder Schwanz. Eine echte metamere Gliederung fehlt dabei aber stets: wohl ist die Körperhaut sehr oft durch Einschnürungen in eine Anzahl scheinbarer Segmente geteilt, aber die inneren Organe nehmen daran keinen Teil. Bisweilen finden sich am Rumpfe durch Muskeln bewegliche Anhänge, die bald als chitinöse Borsten oder schwertförmige Flossen (Triarthra, Polyarthra), bald als armartige Ausstülpungen der Leibeshöhle (Pedalion) in Erscheinung treten (Fig. 11).

Der Fuß, stets ventral vom After gelegen, zeigt eine sehr wechselnde Ausbildung. Nur selten fehlt er ganz (Asplanchna, Anuraea), in vielen Fällen wird er von dem konisch verjüngten Hinterende gebildet, das bei festsitzenden Formen oft stielartig ausgezogen ist (Floscularia, Fig. 7); bei den Philodiniden besteht er aus einer Anzahl von Ringen, die fernrohrartig ineinander eingestülpt werden können. Scharf vom Körper abgesetzt, retraktil und meist wurmförmig geringelt, erscheint der Fuß bei den Brachioniden, wo er am Hinterende des Panzers austritt (Fig. 10), während er bei Gastroschiza und Hudsonella gegen die Mitte der Ventralfläche hin gerückt ist. Das distale Ende trägt meist Zehen, von oft sehr beträchtlicher Länge, ganz selten findet sich hier ein Cilienkranz (Pterodina); bei festsitzenden Formen verbreitet sich das Fußende oft zu einer Haftscheibe (Floscularia, Discopus).

3. Anatomie. 3a) Körperdecke. Der Körper der Rotatorien ist von einer oft glasartig durchsichtigen Haut bedeckt, die sich aus einer strukturlosen Cuticula und einer darunter liegenden Hypodermis (ohne Zellgrenzen) zusammensetzt. Bei den sogenannten illorikaten Rädertieren bleibt die Haut dünn, weich, elastisch, bei den lorikaten erhärtet sie zu einem mehr oder weniger starren Panzer. Dieser umschließt vor allem den Rumpf (bei der Gattung Dinocharis auch Kopf und Fuß) und erscheint bald einheitlich, bald aus Platten oder Feldern zusammengesetzt. Seine Oberfläche ist entweder glatt oder durch Areolen, Höcker, Stacheln, Leisten usw. in mannigfacher Weise skulpturiert; am Vorder- und Hinterrande ist er oft in Dornen ausgezogen, die mitunter länger sind als der eigentliche Körper des Tieres (Notholca longispina). Gallerthüllen werden namentlich bei festsitzenden und zu Kolonien vereinigten Rotatorien ausgeschieden, fehlen aber auch einzelnen freilebenden Formen nicht völlig (Copeus, Mastigocerca setifera).

3b) Räderorgan. Das bald breit abgestutzte, bald verschmälerte und selbst rüsselartig verlängerte Vorderende der Rotatorien trägt das Räderorgan, einen retraktilen Cilienapparat, dessen Wimperspiel schon die ältesten Beobachter an die Bewegungen eines rasch rotierenden Rades erinnerte und so zum Namen der ganzen Klasse Veranlassung gab. Die Ausbildung und Anordnung der Cilien unterliegt sehr

beträchtlichen Verschiedenheiten. Im allgemeinen lassen sich zwei Kränze von Cilien unterscheiden, ein innerer präoraler, Trochus genannt, und ein äußerer postoraler, das sogenannte Cingulum (Fig. 1). Der Trochus trägt in der Regel kräftigere Cilien und dient vor allem der Fortbewegung,

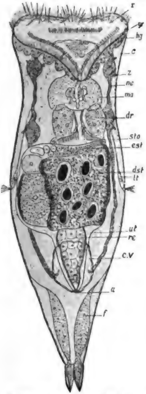


Fig. 1. Hydatina senta Ehrb. a After, c Cuticula, cv Kontraktile Blase, dr Magendrüsen, dst Dotterstock, est Keimstock, f Fußdrüsen, gr Mundgrube, hg Hypodermis, lt laterale Taster, ma Mastax (Kauapparat), ne Nephridien (Exkretionssystem), r Borsten des Trochus, re Enddarm, sto Magen, ut Uterus, z Wimperflammen der Nephridien. Nach Plate. Aus Brauers Süßwasserfauna (Anatomie).

während das Flimmerband des Cingulums, sich in die Mundöffnung fortsetzend, dieser die Nahrung zustrudelt. Dadurch, daß bald der innere, bald der äußere Cilienkranz stärker entwickelt ist, oder beide teilweise verkümmern und sich in einzelne Borstengruppen auflösen (besonders häufig beim Trochus, Fig. 1), zeigt das Räderorgan sehr weitgehende Differenzierungen, die auch systematisch zu verwerten sind. Bei den festsitzenden Floscylariden ist das Vorderende kelchförmig eingesenkt und am Rande in Lappen (Floscularia, Fig. 7) oder armartige Fortsätze (Stephanoceros) ausgezogen, welche sehr lange, dünne, straffe, borstenartige Cilien tragen. Bei gewissen kriechenden Notommata-Arten erstreckt sich der Cilienapparat weit nach der Bauchseite hin in Gestalt eines breiten dicht bewimperten Bandes, was an entsprechende Verhältnisse bei den Gastrotrichen erinnert. Einigen Gattungen der Rädertiere (Apsilus, Atrochus, Balatro, Paraseison nudus) fehlt ein cilienbesetztes Räderorgan.

3c) Verdauungsapparat. Die Mundöffnung liegt fast immer mehr oder weniger subventral. Auf sie folgt, öfters durch Vermittlung eines Mundrohres, ein für die Rotatorien höchst charakteristischer Abschnitt des Verdauungskanals, der Kauapparat oder Mastax (Fig. 2) von Muskeln und „Speicheldrüsen" umgeben. Derselbe besteht aus einer Anzahl kieferartiger, symmetrisch gelagerter Chitinstücke, welche gelenkig gegeneinander bewegt werden können. Man unterscheidet hierbei zunächst ein medianes Stück, den sogenannten Incus, der aus dem unpaaren stielartigen Fulcrum und zwei sich nach vorn anschließenden divergierenden Rami besteht. Gegen diese Rami bewegen sich von den Seiten her die sogenannten Mallei, die ebenfalls aus je zwei Teilen zusammengesetzt sind, dem basalen Manubrium und dem distalen Uncus, der oft mit Zähnen und vorspringenden Leisten bewehrt ist. Alle diese Teile zeigen bei den einzelnen Familien der Rädertiere einen sehr verschiedenen Grad der Ausbildung. So unterscheidet man — um nur einige Fälle herauszugreifen — beispielsweise einen sogenannten malleaten Typus des Kauapparates, bei dem der Malleus besonders kräftig entwickelt ist (Fig. 2, a); er ist besonders bei den Brachioniden verbreitet. Bei der Familie der Asplanchniden und Synchaetiden herrscht der forcipate Typus: hier zeigt der Malleus die Gestalt einer schlanken Zange und die Rami gleichen öfter einer gezähnten Schere (Fig. 2, c). Durch einen besonderen, den ramaten Typus ist die Familie der Philodiniden charakterisiert: hier sind von allen chitinösen Teilen des Mastax eigentlich nur die Rami ausgebildet, und zwar in Gestalt halbkreisförmiger mit zahnartig vorspringenden Leisten versehener Segmente (Fig. 2, d). Auf die Anschwellung des Kauapparates folgt im weiteren Verlauf des Darmkanals der eigentliche Oesophagus als dünnes, meist sehr erweiterungsfähiges Schlundrohr, dessen

peristaltische Bewegungen die Nahrung dem eigentlichen Magen zuführen. Die Wandung desselben besteht fast stets aus einer einfachen Schicht großer polygonal abgeplatteter, nach innen bewimperter Zellen, welche im Leben vielfach gelb oder braun gefärbt und mit Fettkugeln erfüllt erscheinen. An seinem Eingang münden meist in der

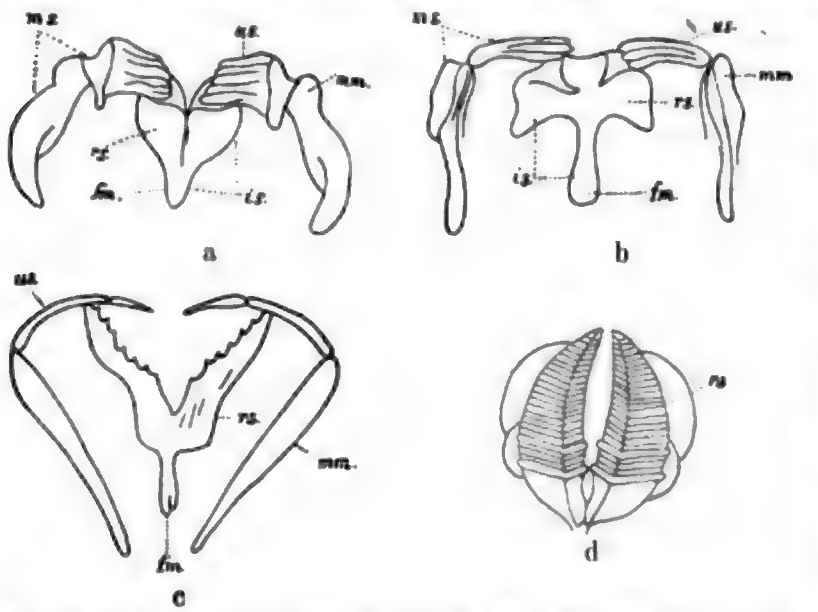


Fig. 2. Verschiedene Typen des Kauapparats. a malleat, b submalleat, c forcipat, d ramat. fm Fulcrum, is Incus, mm Manubrium, ms Malleus, rs Ramus, us Uncus. Brauers Süßwasserfauna.

Zweizahl paarige Drüsen, die wahrscheinlich ein die Verdauung beförderndes pankreatisches Sekret absondern. An den Magen schließt sich ein kurzer flimmernder Enddarm, der durch eine Kloake dorsalwärts ausmündet. Bei einzelnen Gattungen (Asplanchna, Paraseison) fehlen Enddarm und After und die Nahrungsreste werden durch den Mund ausgespieen.

3d) Exkretionssytem. Die Nephridien der Rotatorien bestehen aus zwei gewundenen und stellenweise geknäuelten Kanälen, welche an den Seiten des Körpers meist bis zur Kopfregion ziehen und in ihrem Verlaufe eine wechselnde Anzahl von Flimmerkölbchen oder Wimperflammen tragen. Mit wenigen Ausnahmen (Lacinularia) münden die Kanäle in eine sogenannte kontraktile Blase, die ihren Inhalt pulsierend in die Kloake entleert.

3e) Geschlechtsorgane. Die Geschlechtsorgane der weiblichen Rädertiere liegen normalerweise ventral vom Darm und zeigen meist eine deutliche Sonderung in einen Keimstock, welcher die eigentlichen Eizellen liefert, und in einen Dotterstock, dem nutritive Funktionen zukommen. Bei den Philodiniden sind beide Organe paarig angelegt, bei den übrigen Süßwasserrotatorien unpaar. Der Keimstock ist stets klein und tritt wenig hervor, während der Dotterstock oft eine recht beträchtliche Größe und auffallende Gestalt (z. B. hufeisenförmig bei gewissen Asplanchna-Arten) gewinnt: er zeigt meist acht große Dotterkerne. Bei der Familie der Philodiniden fallen die Eier einfach in die Leibeshöhle, wo sie ihre ganze Entwickelung durchmachen; bei den übrigen Rotatorien setzt sich die Hülle, welche die Gonade umschließt, in einen Eileiter fort, welcher in die Kloake mündet. Bei viviparen Formen wie Asplanchna entwickeln sich die Eier in einem erweiterten Abschnitt des Eileiters, der als Uterus fungiert.

3f) Nervensytsem und Sinnesorgane. Das zentrale Nervensystem der Rädertiere wird durch ein großes Cerebralganglion repräsentiert, welches dorsal vom Schlunde liegt. Von ihm strahlen eine Anzahl Nervenfasern aus, welche den Räderapparat, die Muskeln und dann vor allem auch die Sinnesorgane innervieren. Von letzteren kommen besonders die sogenannten Taster in Betracht, Büschel feiner Cilien, seltener einzelne Borsten, welche auf gangliösen Anschwellungen der Nervenfasern sitzen. Man unterscheidet hierbei Stirntaster im Bereich des Räderorgans, weiter Dorsaltaster, meist unpaar im Nacken gelegen und öfters, wie bei der Gattung Brachionus und dann besonders bei den Philodiniden papillenartig verlängert. Paarige Dorsaltaster besitzt die Gattung Asplanchna. Dazu kommen noch laterale Taster, die (ebenso wie der dorsale) bisweilen weit nach hinten gerückt sind, vereinzelt auch asymmetrisch auftreten. Sehr oft trägt das Gehirn ein medianes Auge mit rötlichem oder violettem Pigmentbecher und Linse; Triarthra, Pedalion und Pterodina besitzen zwei solcher Augen. Daneben finden sich im Bereich des Räderorgans noch einfache Pigmentflecke, die sogenannten Neben- oder Stirnaugen.

3g) Muskelsystem und Bindegewebe. Die Rotatorien haben meist eine glatte Muskulatur; Querstreifung zeigen die Gattungen Pedalion, Triarthra, Pterodina und in etwas abweichendem Bau auch Polyarthra. Besonders kräftig sind die longitudinalen Muskelzüge ausgebildet, welche als Retraktoren für das Räderorgan und den Fuß wirken. Die Ringmuskulatur unter

der Haut ist oft so regelmäßig angeordnet, daß sie eine Segmentierung des Körpers vortäuscht. Bindegewebe ist bei den Rädertieren nur schwach entwickelt, meist in Gestalt feiner Fasern und Fäden, welche die inneren Organe in der geräumigen Leibeshöhle suspendiert erhalten.

3h) Drüsen. Als retrocerebrales Organ bezeichnet man nach dem Vorgang von Beauchamp ein bei Rotatorien weit verbreitetes, früher als „Kalkbeutel" angesprochenes drüsenartiges Organ, welches dorsal hinter dem Cerebralganglion liegt. Es besteht meist aus einem unpaaren medianen Sack mit stark lichtbrechendem Inhalt, welcher sich vorn in zwei, innerhalb des Räderorgans mündende Ausführgänge gabelt; darunter liegt eine fast stets paarige Drüse. Die Funktion des Organs ist noch völlig unbekannt. Fußdrüsen oder Klebdrüsen finden sich als Umbildungen der Hypodermis fast bei allen Rädertierfamilien. Sie sind meist paarig vorhanden und sondern an den Zehenenden ein klebriges Sekret ab, das zum Festheften dient. Am stärksten sind sie bei den Seisoniden und Philodiniden entwickelt, in deren langem Fuß bis zehn solcher Drüsen hintereinander sitzen können. Bisweilen sammelt sich das Sekret in einem besonderen Reservoir, das am auffälligsten bei der Familie der Rattuliden an der Basis des ansehnlichen Fußstachels entgegentritt (Fig. 9 R).

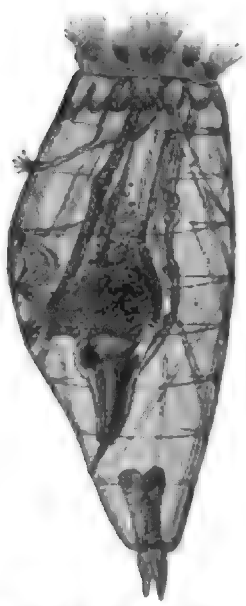


Fig. 3. Hydatina senta Ehrb. Männchen. Nach Weber. Aus Brauers Süßwasserfauna.

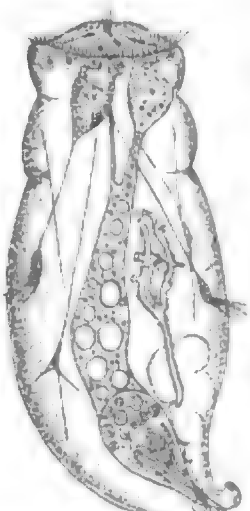


Fig. 4. Asplanchna priodonta Gosse. Männchen. Original.

4. Die männlichen Rotatorien. Bis gegen die Mitte des 19. Jahrhunderts sind die Rädertiere allgemein für Zwitter gehalten worden. Erst Brightwell lehrte 1848 an der nach ihm benannten Asplanchna Brightwelli die Männchen kennen und bewies damit, daß die Geschlechter getrennt sind. Zur Zeit sind die Männchen von etwa 50 Gattungen bekannt. Nur bei den marinen Seisoniden und den Süßwasserformen Rhinops vitrea und Proales Wernecki haben die Männchen im allgemeinen noch die Gestalt und Organisationsstufe der Weibchen bewahrt. Bei allen übrigen Rotatorien dagegen zeigen die Geschlechter einen sehr ausgesprochenen Dimorphismus: die Männchen — welche stets viel seltener als die Weibchen auftreten — sind durchgängig weit kleiner und zeigen eine sehr weitgehende Reduktion ihrer inneren Organisation (Fig. 3 und 4). Bei den lorikaten Formen fehlt in den meisten Fällen der starre Panzer; das Räderorgan ist stets mehr oder weniger rückgebildet, der Darmkanal zu einem Zellstrang reduziert. Muskel- und Nervensystem erscheinen weniger berührt, dagegen fehlt dem Exkretionssystem männlicher Rädertiere öfter die kontraktile Blase. Das Hauptorgan bildet der birnförmige oder rundliche Hoden, der mit wimmelnden Spermatozoen erfüllt ist. Bisweilen ist ein deutlicher dorsaler Penis mit Cilienkranz am Ende vorhanden, wie bei der Gattung Brachionus, im anderen Falle übernimmt das verjüngte Hinterende dessen Funktionen (Fig. 4). Auffallend ist, daß bei der ganzen Familie der Philodiniden bisher keine Männchen bekannt geworden sind, obwohl zu dieser Abteilung einige der gemeinsten Rädertiere wie Rotifer vulgaris usw. gehören.

5. Physiologie. 5a) Bewegung. Die Mehrzahl der freilebenden Rotatorien bewegt sich durch Schwimmen fort, das hauptsächlich durch die Cilien des Trochus bewirkt wird; meist ist damit eine Rotation um die Längsachse verbunden. Die größte Geschwindigkeit dürfte wohl Microcodon clavus entwickeln, das pfeilschnell durch das Wasser schießt. Einige Gattungen wie Triarthra, Polyarthra vermögen sich außerdem auch mit Hilfe chitinöser Springborsten und Ruderflossen weit durch das Wasser zu schnellen, ebenso die Gattungen Scaridium und Monommata, welche sich dazu ihres muskulösen Fußes bezw. der stelzenartig langen von Muskeln durchzogenen Zehen desselben bedienen. Formen, bei denen das Räderorgan in Gestalt eines gleichmäßig bewimperten, oft nach der Ventralseite verschobenen Cilienfeldes entwickelt ist (Notommatidae, Salpinidae) zeigen mehr ruhig gleitende Bewegungen. Kriechende Bewegung nach Art der Spannerraupen, wobei sich das eingezogene Räderorgan und der Fuß abwechselnd an die

Unterlage festheften, charakterisiert die Familie der Philodinen.

5b) Nahrungsaufnahme. Die Nahrungsaufnahme erfolgt hauptsächlich mit Hilfe der Cilien des Cingulums, dessen Wimperspiel im Wasser einen Strudel erzeugt und Fremdkörper der Mundöffnung zuführt. Als Nahrung werden kleine Algen, Diatomeen, Flagellaten, weiter auch organischer Detritus usw. aufgenommen, wobei oft eine gewisse Auswahl zu beobachten ist. Asplanchna frißt auch andere Rädertiere, selbst große Formen mit langen Dornen. Bei den Flosculariden wirken die auf Vorsprüngen des Mundkelchrandes stehenden langen straffen Borsten wie eine Reuse, indem sie sich über den vom inneren Cilienkranz eingestrudelten Organismen zusammenschließen und so ein Entweichen verhindern.

Eigenartig und weitgehend spezialisiert ist die Nahrungsaufnahme der Gattung Anapus: hier wird mit Hilfe des weit vorgestoßenen spitzen Kauapparates der Panzer von Dinoflagellaten (Peridinium) angebohrt und der plasmatische Zellinhalt ausgesogen; der Magen des Rädertieres ist stets von den braunen Flagellaten-Chromatophoren erfüllt. Aehnliche braune Chromatophoren finden sich unter Ausschluß jeglicher anderer Nahrung auch bei Hudsonella, bei der der Magen sonst blau, die Flüssigkeit der Leibeshöhle rosa gefäbt ist — das auffallendste Beispiel von Färbung bei Rotatorien. Bei Ascomorpha ecaudis (Sacculus viridis Gosse), Diglena biraphis, Eosphora aurita findet man den Magen stets erfüllt mit einzelligen grünen Algen, die durchaus an Zoochlorellen erinnen.

Eine intrazelluläre Verdauung, wie sie unter den Würmern für die Turbellarien nachgewiesen ist, fehlt den Rotatorien. Die aufgenommene Nahrung wird im Magen durch enzymhaltige Sekrete, an deren Ausscheidung die sogenannten Magen- oder pankreatischen Drüsen einen besonderen Anteil nehmen dürften, verdaut und dann in flüssiger Form von den zartwandigen Magenzellen aufgenommen. Bei gut genährten Tieren zeigen letztere meist eine gelbliche oder bräunliche Färbung und enthalten zahlreiche Fettkugeln, die beim Hungern schwinden.

5c) Atmung. Besondere Atmungsorgane fehlen den Rotatorien, der Gasaustausch erfolgt durch die gesamte permeable Haut. Besonders dürfte es das Räderorgan sein, welches auch den sessilen Formen stets neues Atemwasser zuführt. In bezug auf das Sauerstoffbedürfnis verhalten sich die Rädertiere recht verschieden: die im freien Wasser und die zwischen Pflanzen lebenden Arten sind recht sauerstoffbedürftig und sterben bei Mangel an Atemluft bald ab. Ganz anders die Formen, welche sapropelisch, im faulenden Schlamm am Grunde der Gewässer hausen. Hier gibt es eine Reihe von Arten wie Floscularia atrochoides, Atrochus tentaculatus, Diglena biraphis, Diplacidium (Diplax) trigona, Rotifer vulgaris usw., die durchaus anaerob zu leben vermögen, also auch dort noch ausdauern und sich fortpflanzen, wo Sauerstoff überhaupt nicht mehr oder doch nur in Spuren nachzuweisen ist. Allem Anschein nach greift hier die sogenannte intramolekulare Atmung ein, worauf das reichliche Vorkommen von Glykogen bei Rotifer aus derartigen Lokalitäten hindeutet.

6. Fortpflanzung und Entwickelung. Die Fortpflanzung der Rädertiere erfolgt durch Eier, welche meist nach außen abgelegt werden; bei Asplanchna vollzieht sich die Entwickelung im Uterus und es werden bewegliche Junge geboren. Eine ähnliche Viviparie zeigen auch die Philodiniden: hier entwickeln sich die Eier frei in der Leibeshöhle und die Jungen gelangen nach Plate dadurch ins Freie, daß sie die Wand der Kloake durchbohren und zum After austreten. Man kann bei den Rotatorien drei Sorten von Eiern unterscheiden: 1. Subitaneier, früher „Sommereier“ genannt; 2. Latenz- oder Dauereier, fälschlich auch als „Wintereier“ bezeichnet. 3. Männcheneier. Die Subitaneier sind stets von einer dünnen Schale umhüllt. Ihre Größe und Gestalt ist recht verschieden: bald sind sie kugelig, bald oval, seltener länglich und an den Enden verschmälert. Das größte Ei dürfte Anuraeopsis hypelasma aufweisen, welches fast die Länge des mütterlichen Panzers erreicht. Die Subitaneier werden oft an feste Gegenstände, Wasserpflanzen usw., bisweilen auch an Tiere abgelegt; bei Formen mit Gallerthülle machen sie in dieser ihre Entwickelung durch. Nicht selten tragen auch die Weibchen die Eier — oft in der Mehrzahl am Hinterende festgeheftet — mit sich herum, was namentlich in der Familie der Brachioniden und Anuraeen die Regel ist. Bei der Gattung Pompholyx sind die Eier an elastischen Stäbchen befestigt, welche aus der hinteren Panzeröffnung herausragen. Im Gegensatz zu den dünnschaligen Subitaneiern sind die Latenz- oder Dauereier meist durch eine dickere, oft dunkler gefärbte und etwas abstehende Schale geschützt. Ihre Oberfläche ist nur selten glatt, in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle erscheint sie mit Punkten, Areolen, Stacheln, Höckern, Leisten, wabenartigen Kammern usw. bewehrt (Fig. 5). Die Männcheneier gleichen im allgemeinen den weiblichen Subitaneiern, sind aber viel kleiner.

Wie aus der Bezeichnung „Sommereier“ und „Wintereier“ hervorgeht, glaubte man

früher, daß erstere in der wärmeren, letztere gegen die kältere Jahreszeit hin gebildet würden. Diese Auffassung ist nicht ganz zutreffend, denn beide Eisorten können zu allen Jahreszeiten vorkommen; ihr Auftreten steht, wie dasjenige der Männcheneier,

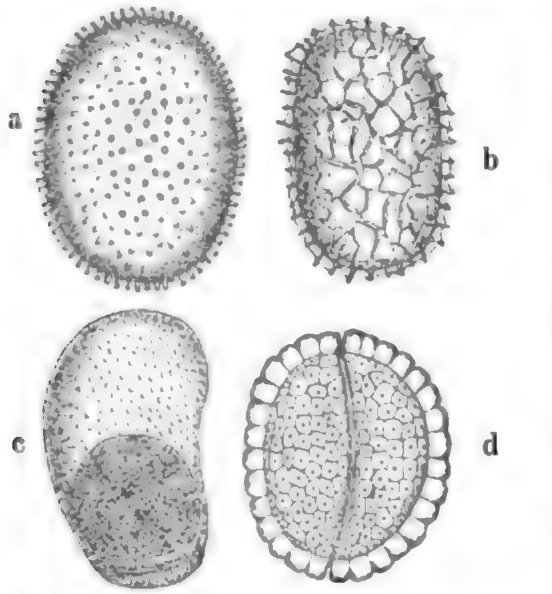


Fig. 5. Dauereier verschiedener Rotatorien. a von Polyarthra platyptera Ehrb. b von Anuraea aculeata Ehrb. c von Brachionus pala Ehrb. d von Pedalion mirum Hudson. Original.

in ganz bestimmten Beziehungen zum jeweiligen Generationszyklus der Art. Es empfiehlt sich also die ausschließliche Verwendung der Bezeichnungen Subitaneier und Latenz- oder Dauereier, zumal diese auch die Tatsache zum Ausdruck bringen, daß erstere sich direkt, letztere erst nach einer Ruheperiode entwickeln, in welcher das Rädertier alle Fährlichkeiten (Austrocknung des Gewässers usw.) wohlgeschützt zu überdauern vermag.

Es darf als gesicherte Tatsache gelten, daß die aus Dauereiern ausschlüpfenden Rädertiere durchweg Weibchen sind, welche sich zunächst ausschließlich parthenogenetisch fortpflanzen. Nach einer bei den verschiedenen Arten wechselnden Reihe parthenogenetischer, rein weiblicher Generationen treten an Stelle der bisher produzierten größeren Subitaneier kleinere Eier auf, welche Männchen liefern. Die ausgeschlüpften Männchen schwärmen lebhaft im Wasser umher, hängen sich, öfter in Mehrzahl, an die Weibchen, führen ihr Begattungsorgan entweder durch die Kloake oder durch eine nachgiebige Stelle der Körperhaut in das Innere derselben ein und befruchten so die kleinen Eier, welche dadurch zu Dauereiern werden. Die Dauereier sind also ihrer Entstehung nach nichts anderes als befruchtete Männcheneier. Mit ihrer Bildung schließt der jeweilige Generationszyklus des Rädertiers ab und die Art verschwindet meist für kürzere oder längere Zeit.

Soweit die Tatsachen. Die Frage nun, welche Ursachen das Auftreten der Männchen und damit den Eintritt der geschlechtlichen Fortpflanzung bei den Rädertieren bedingen, ist mehrfach Gegenstand experimenteller Forschung gewesen, wobei stets Hydatina senta, eine leicht austrocknende schmutzige Tümpel bewohnende Art, als Versuchstier diente. Bei ihr glaubte Maupas (1891) gefunden zu haben, daß das Auftreten der Männchen und der Eintritt der Geschlechtsperiode durch Erhöhung der Temperatur bewirkt wird, während Nußbaum (1897) hierfür ungenügende Ernährung der Weibchen während einer gewissen Entwickelungsphase verantwortlich machte. Punnet (1906) leugnet einen Einfluß äußerer Faktoren auf den Eintritt der Geschlechtsperiode, während Shull (1910, 1911) umgekehrt den inneren Faktoren eine Bedeutung nach dieser Richtung hin abspricht.

Die Anschauungen von Maupas und Nußbaum harmonieren nun in keiner Weise mit dem Eintreten der Geschlechtsperioden an den natürlichen Aufenthaltsorten der Rädertiere, wo Männchen und Dauereier sowohl bei steigender als bei fallender Temperatur, bei guter und schlechter Ernährung gebildet werden. Es zeigt sich vielmehr, daß in ein und demselben Gewässer manche Rotatorien jährlich nur einmal, andere zwei oder mehrere Male zur geschlechtlichen Fortpflanzung schreiten und dieser Vorgang wiederholt sich in ähnlicher Weise jahraus jahrein in Gewässern von sehr verschiedenen Existenzbedingungen und in weit entfernten Gebieten. Man kann also (wie bei den Daphniden) monozyklische, dizyklische und polyzyklische Formen unterscheiden. Bei den monozyklischen Rotatorien tritt die Geschlechtsperiode im Laufe des Jahres nur einmal ein, so beispielsweise bei den sogenannten Sommerformen der Planktonrädertiere, welche im Frühling oder Vorsommer den Dauereiern entschlüpfen, den Sommer über sich lebhaft parthenogenetisch vermehren, um dann im Herbste nach Bildung von Männchen und Dauereiern wieder für eine Reihe von Monaten zu verschwinden. Hierher gehören als Beispiele Pedalion mirum, Schizocerca diversicornis, Mastigocerca setifera u. a. Die dizyklischen Formen haben zwei Geschlechtsperioden, eine im Frühjahr, die andere gegen den Herbst. Von den Planktonrotatorien gehört vor allen Asplanchna priodonta hierher. Bei den polyzyklischen Formen endlich wiederholen sich die Geschlechtsperioden im Jahre mehrmals. Das bekannteste Beispiel hierfür bietet Hydatina senta, bei der die geschlechtliche Fortpflanzung schon

bald nach dem Verlassen der Dauereier einsetzt, ein Umstand, welcher die Erhaltung der Hydatina-Bestände auch in sehr rasch wieder austrocknenden Tümpeln sichert.

Alle diese Beobachtungen im Freien drängen zu dem Schlusse, daß hier das Auftreten von Männchen und die Bildung von Dauereiern an gewisse Generationen gebunden und erblich fixiert ist. Mit anderen Worten: Der Eintritt der Geschlechtsperiode hängt bei den Rotatorien nicht von unmittelbar und direkt einwirkenden äußeren Ursachen ab, sondern ist in erster Linie im jeweiligen Entwickelungsgang der einzelnen Arten begründet und wird nur sekundär durch äußere Faktoren modifiziert (Lauterborn 1898). Wir hätten uns also vorzustellen, daß die Fähigkeit zur parthenogenetischen Fortpflanzung keine unbeschränkte ist, sondern nach Ablauf einer bestimmten, bei den verschiedenen Arten wechselnden Zahl von Generationen erlöscht. Es stellt sich dann eine Art Befruchtungsbedürfnis ein, vergleichbar dem Kopulationsbedürfnis der Infusorien nach einer längeren Reihe ungeschlechtlicher Teilungen. Dieser physiologische Depressionszustand tritt auch morphologisch in gewissen Veränderungen des Ovars, sowie im Auftreten der kleinen Männcheneier in Erscheinung. Erst die Befruchtung stellt den ursprünglichen Zustand wieder her.

Entwickelung. Die Furchung des Rädertiereies ist eine totale, inäquale, die Gastrula epibolisch. Schon verhältnismäßig früh zeigt sich auf der Ventralseite eine Einbuchtung, welche den hinteren Teil des Embryos als Fuß abgliedert; dorsal davon bildet sich der After als Einstülpung des Ektoderms. Eine eigentliche Metamorphose fehlt. Nur bei den Floscelariden unterscheiden sich die freischwimmenden Jungen von den festsitzenden alten Tieren dadurch, daß der gestreckt kegelförmige Körper vorn einen flimmernden Cilienkranz trägt, während das Hinterende mit einem Cilienbüschel versehen ist.

7. Geographische Verbreitung. Die Rotatorien sind allem Anschein nach zum größten Teil — wenn nicht durchweg — Kosmopoliten, welche die verschiedensten Gewässer aller Zonen bewohnen und oft in weit entfernten Kontinenten in durchaus identischen Arten und selbst Varietäten auftreten. Dieser Umstand läßt sie naturgemäß für tiergeographische Fragen weit weniger geeignet erscheinen als etwa die Phyllopoden, Calaniden usw. Die universelle Verbreitung dürfte in erster Linie den Dauereiern zu verdanken sein, welche ein Austrocknen ohne Schaden zu ertragen vermögen und in diesem Zustand durch Luftströmungen, Zugvögel usw. weithin verfrachtet werden können.

Wie bei den Protozoen wird auch das Vorkommen der Rotatorien in erster Linie durch die physische und chemische Beschaffenheit ihrer Wohngewässer, also durch spezielle Bedingungen der nächsten Umwelt, bedingt. Die geographische Lage und das davon direkt abhängige allgemeine Klima spielen bei der geographischen Verbreitung der Rotatorien eine mehr sekundäre Rolle, vor allem dadurch, daß sie die Ausprägung bestimmter Gewässertypen — stark durchwärmte periodisch austrocknende Gewässer in warmen Gebieten, kühlere moosige Hochmoor-Tümpel in den Gebirgen der gemäßigten Zonen sowie im Norden usw. — begünstigen. Derartige Gewässer zeigen unter sich selbst in geographisch weit getrennten Gebieten oft eine sehr weitgehende Aehnlichkeit in der Zusammensetzung ihrer Fauna während andere, selbst recht nahe liegende, von abweichender Beschaffenheit, ganz andere Formen beherbergen können. So zeigt, um nur ein Beispiel anzuführen, die Fauna eines Sphagnum-Moores im Schwarzwald oder in den Vogesen weit mehr gemeinsame Züge mit der Fauna gleichartiger Gewässer im hohen Norden, als mit der Tierwelt eines versumpften Altwassers der Rheinebene, dessen Protozoen und Rotatorien dagegen in ganz ähnlicher Zusammensetzung in den Altwassern des Mississippi und seiner Zuflüsse wiederkehren.

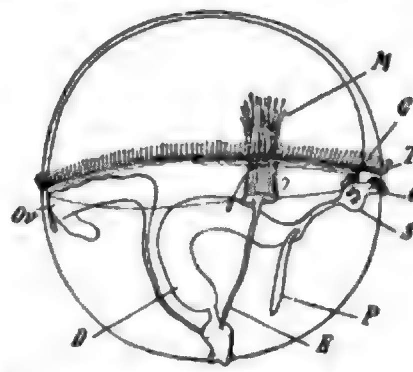


Fig. 6. Trochosphaera aequatorialis Semper. C Cingulum, D Darm, E Exkretionsorgan, G Cerebralganglion, M Muskeln, Ov Ovarium, P Pankreatische Darmdrüsen, Tr Trochus. Nach Semper. Aus Claus-Grobbens Lehrbuch der Zoologie.

Unter diesen Gesichtspunkten gewinnt auch die oft recht eigenartige disjunkte Verbreitung mancher Rädertiere ihre Erklärung. Hierfür einige Belege. Die Gattung Trochosphaera (Fig. 6), von Semper in überschwemmten Reisfeldern der Philippinen entdeckt und später auch in Australien gefunden, galt lange für eine durchaus tropische Form, bis ein zweiter Vertreter der Gattung, die zuerst aus China beschriebene Trochosphaera solstitialis auch in Nordamerika nachgewiesen wurde, und zwar ebenfalls in pflanzenreichen stark durchwärmten Gewässern. Es ist durchaus nicht ausgeschlossen, daß die Gattung auch noch bei uns an entsprechenden Lokalitäten im Hochsommer angetroffen wird. Dafür spricht auch die Verbreitung von Megalotrocha semibullata

Hudson, einer freischwimmende Kolonien bildenden Melicertide. Diese Art wurde erst 1889 entdeckt, und zwar in Australien, später wurde sie dann in Süd-China, Neu-Guinea, sowie in Süd-Afrika gefunden. Daß auch dieses Rädertier keine eigentliche Tropenform ist, beweist ihr weiteres Vorkommen bei Genf, sowie bei Mannheim in der Rheinebene; sie ist eben nur eine thermophile Form, die zu ihrer Entwickelung bestimmte Gewässer (pflanzenreiche, periodisch austrocknende Tümpel mit warmen klaren Wasser) verlangt, und darum bei uns auch nur im Sommer auftritt.

8. Vorkommen und Biologie. Das Vorkommen der Rotatorien erstreckt sich auf das Süßwasser sowohl wie auf das Meer; eine Reihe von Formen nehmen mit so geringen Wassermengen verlieb, daß man sie als „Erdrotatorien" bezeichnet hat. Auch parasitische Lebensweise kommt vor.

8a) Süßwasser. Die weitaus größte Art- und Individuenzahl an Rädertieren beherbergt das Süßwasser, das schon darum wohl auch als die eigentliche Heimat der ganzen Klasse zu betrachten ist. Die Mehrzahl lebt hier in stagnierenden vegetationsreichen Gewässern, schwimmend oder kriechend. Manche Formen sind an Pflanzen, Steinen, Holz usw. festgeheftet, entweder solitär (Floscularia) oder zu Kolonien vereint (Lacinularia), doch können in ein und derselben Gattung sowohl festsitzende auch freischwimmende Arten auftreten wie bei Floscularia und Megalotrocha. Auch die Philodiniden haben einige, wenigstens zeitweise festsitzende Formen (Callidina-Arten, Rotifer mento, dieser sogar mit Wohnröhre). Zahlreiche sessile Formen scheiden eine schützende Gallerthülle ab (Floscularia, Stephanoceros) oder leben in ziemlich festen Röhren (Limnias), andere bauen sich eine Hülle aus Fremdkörpern oder den eigenen Exkrementen (Melicerta).

Neben dem Gewirre der Wasserpflanzen wird auch der freie Schlamm und Schlick am Grunde der Gewässer von einer ganzen Anzahl Rädertiere bewohnt, doch verdient hervorgehoben zu werden, daß die großen Tiefen unserer Seen keine ihnen eigentümliche Formen aufzuweisen haben. Recht reich belebt sind besonders die braunen Diatomeenfilze auf Schlickgrund und zwar besonders von Arten der Gattungen Rotifer, Diaschiza, Diglena, Notommata usw. Der typisch sapropelischen anaerob lebenden Rotatorien wurde bereits oben beim Abschnitt über die Atmung gedacht (5c).

Auch das freie Wasser hat seinen eigenen Bestand an Rädertieren. Zu diesen pelagischen oder Plankton-Rotatorien gehören die Familien der Asplanchniden, Synchaetiden, Triarthriden, Ploesomatiden, Anapodiden sowie Pedaliniden ganz, die Mehrzahl der Anuraeen, viele Brachioniden und Rattuliden, einige Gastropodiden und Hydatiniden sowie die Gattung Pompholyx aus der Familie der Pterodiniden. Selbst die Rhizoten stellen in den Gattungen Floscularia, Conochilus und Conochiloides eine Anzahl Ver-

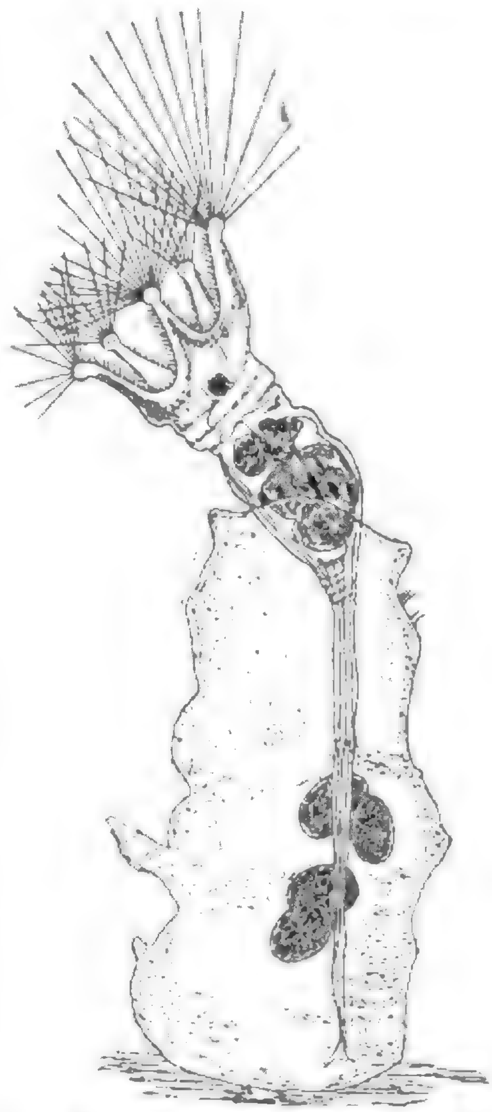


Fig. 7. Floscularia coronetta Cub. Nach Hudson-Gosse. Aus Brauers Süßwasserfauna.

treter; Philodiniden fehlen im Plankton völlig. Alle diese Formen beleben die freien Wasserflächen unserer Seen — diese vorherrschend in den oberen durchleuchteten Schichten — dann aber vor allem Altwässer, Teiche und Tümpel oft in so beträchtlichen Mengen, daß gerade diese Massenentfaltung der Rotatorien als ein Haupt-Charakterzug des Süßwasser-Planktons überhaupt betrachtet werden darf. Als Anpassung an die Lebensweise im freien Wasser wird die glasartige Durchsichtigkeit des Körpers aufgefaßt, welche vor allem die Asplanchna- und Synchaeta-Arten auszeichnet, dann die Ausbildung langer, die Schwebefähigkeit

erhöhender Fortsätze des Körpers, wie sie in extremster Weise bei Notholca longispina ausgeprägt sind; einen durchgreifenden Unterschied gegenüber den am Boden und zwischen Pflanzen lebenden Formen stellen aber beide Charaktere nicht dar.

Wie oben bereits erwähnt, ist das örtliche Vorkommen mancher Rädertiere in hohem Grade an das Zusammentreffen bestimmter physischer und chemischer Bedingungen ihrer Wohngewässer gebunden. Diese Abhängigkeit ist oft derart, daß wir von „Leitformen" für bestimmte Gewässertypen sprechen dürfen. So ist beispielsweise für Gewässer, die durch Zufuhr gelöster organischer Substanz mehr oder weniger „verunreinigt" werden, die Massenentfaltung gewisser Brachioniden (Brachionus pala, Brachionus budapesthinensis, Schizocerca usw.), weiter von Asplanchna Brightwellii, in kleineren Gewässern auch von Asplanchna Sieboldii charakteristisch. Ephemere, periodisch austrocknende Tümpel haben bei schmutzigem Wasser als Leitform Hydatina senta, bei klarem Wasser mit Pflanzenwuchs Megalotrocha semibullata. Kalkarme Moorgewässer mit Sphagnum-Moosen sind durch das Vorkommen von Rotifer Roeperi, Copeus spicatus, Microcodites chlaena, Arthroglena Luetkeni, Anuraea serrulata, Elosa Woralli usw. ausgezeichnet. Nur in fließenden Gewässern findet sich als rheophile Charakterform Furcularia Reinhardti.

Wie das örtliche, erscheint oft auch das zeitliche Vorkommen mancher Rotatorien von bestimmten Bedingungen abhängig. Ein großer Teil von ihnen kommt mehr oder weniger häufig das ganze Jahr hindurch, auch unter einer dicken Eisdecke, vor; nur der Eintritt der Geschlechtsperiode und die Bildung der Dauereier bedingt ein zeitweiliges Verschwinden. Das sind die eurythermen perennierenden Formen. Andere sind in ihren Auftreten streng auf bestimmte Jahreszeiten beschränkt. So gibt es eine ganze Anzahl Rädertiere, die als stenotherme Sommerformen nur in der wärmeren Jahreszeit erscheinen, wie beispielsweise die Gattungen Pedalion, Pompholyx, Schizocerca, Anuraeopsis, Anapus, dann eine Reihe von Arten der Gattungen Synchaeta (S. grandis, S. stylata), Mastigocerca (M. capucina, M. setifera) usw. — um nur bei den Planktonformen zu bleiben. Auch stenotherme Winterformen sind bekannt, so beispielsweise Notholca-Arten der Formenreihe Notholca acuminata-labis-striata, Notholca foliacea, deren Hauptvorkommen auf Winter und Vorfrühling fällt.

Temporal- und Lokalvariation. Der Wechsel der Jahreszeiten beeinflußt eine Anzahl Rotatorien auch nach einer anderen Richtung hin: er bewirkt periodische, bestimmt gerichtete Gestaltsveränderungen, die man als Cyclomorphose bezeichnet hat. Diese temporalen Variationen zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Gang der jährlichen Temperatur-Kurve des Wassers und prägen sich in verschiedener Weise aus. Bald treten sie als einfache Zu- bezw. Abnahme der Körpergröße in Erscheinung, bald als wechselnde Ausbildung der Körperfortsätze, vor allen der Dornen des Panzers; auch Veränderungen der Oberflächenstruktur kommen vor.

Ein ausgezeichnetes Beispiel nach dieser Richtung hin bietet die perennierende Anuraea cochlearis. Dieselbe reduziert in zahlreichen Gewässern vom Winter bis zum Hochsommer unter steter Abnahme der Körpergröße ihren langen Hinterdorn bis zum völligen Verschwinden (var. tecta); mit dem Fallen der Temperatur im Herbste nehmen Dorn und Körpergröße wieder zu. Zwei andere Variationsreihen derselben Art zeigen eine zunehmende Bewehrung des Panzers mit Stacheln sowie bestimmte Verschiebungen in der Anordnung der Panzerplatten, die schließlich zu den ausgesprochenen Sommervarietäten hispida und irregularis führen.

Neben diesen temporalen Variationen sind zahlreiche Rotatorien auch fluktuierenden und lokalen Variationen unterworfen, bei denen aber eine direkte Abhängigkeit von äußeren Faktoren noch nicht in allen Fällen nachgewiesen ist.

Besonders ausgezeichnet nach dieser Richtung hin sind die Gattungen Brachionus, Anuraea und Notholca. Eine ganze Anzahl früherer „Arten" dieser Gattungen sind jetzt als einfache Varietäten erkannt, welche, durch zahlreiche Zwischenformen miteinander verknüpft, nur die Glieder geschlossener Formenreihen einiger weniger polymorpher Gesamtarten darstellen. So zeigt beispielsweise Brachionus Bakeri als Ausgangspunkt der Formenreihe eine Form mit zwei ansehnlichen Dornen am Hinderrande des Panzers (Fig. 10). Die fortschreitende Verkürzung dieser Fortsätze führt zunächst zur var. brevispinus, weiter zur var. rhenanus, bei welcher die Dornen nur noch als vorspringende Ecken des Panzers angedeutet sind und schließlich zur var. cluniorbicularis als Endglied der Reihe, bei der die hinteren Dornen verschwunden sind und der Panzerrand abgerundet erscheint.

8b) Erdrotatorien. Schon seit den Zeiten Leeuwenhoeks ist bekannt, daß gewisse Rädertiere zusammen mit Tardigraden u. a. Oertlichkeiten bewohnen, welche einen großen Teil des Jahres völlig trocken liegen und nur bei Regen eine vorübergehende Benetzung erfahren. Das sind die sogenannten Erdrotatorien, welche in Dachrinnen,

Moospolstern und Flechtenkrusten auf Dächern, Felsen, Bäumen usw. gefunden werden. Zu dieser biologisch sehr interessanten Gruppe gehören so gut wie ausschließlich Philodiniden: neben einigen Adineta- und Philodina-Arten ganz besonders Angehörige der Gattung Callidina, die hier in einer Reihe charakteristischer Arten vertreten ist, wie beispielsweise Callidina Leitgebii und Callidina symbiotica, die nach Zelinkas Beobachtungen ausschließlich an gewissen Baum-Lebermoosen der Gattungen Frullania, Radula und Lejeunia vorkommen, wo sie als „Raumsymbionten" in kappenförmigen Höhlungen der Moosblätter sitzen. Die Lebenstätigkeit all dieser Formen erwacht erst, wenn ein kräftiger Regen die Aufenthaltsorte durchnäßt. Verdunstet das Wasser wieder, so kontrahieren sich die Tiere (anscheinend unter starker Verminderung ihres Flüssigkeitsgehaltes), scheiden eine Gallerthülle ab und gehen so in ein Dauerstadium über, das sie allen Fährlichkeiten trotzen läßt. In diesem Zustand latenten Lebens sind die Erdrotatorien nicht nur befähigt jeder Austrocknung zu widerstehen, sondern erscheinen auch gegen sehr extreme Gegensätze der Temperatur gefeit. Bereits 1861 berichtete Broca (Mém. Soc. Biol. p. 44), daß derart eingetrocknete Rädertiere einen Temperaturwechsel von —17,6° auf +78° ertrugen, ohne die Fähigkeit zu verlieren nach Wasserzusatz wieder aufzuleben; selbst Temperaturen von 100° werden bei einer Einwirkung von 5 Minuten Dauer noch ohne Schädigung überstanden. Ganz ähnliche Ergebnisse erhielt Zelinka, welcher Callidina symbiotica einer Kälte von —20° C und einer Wärme von + 70° C aussetzte, ohne daß die Tiere zugrunde gingen. Diese erstaunliche Lebenskraft zeigen aber, wie besonders betont werden muß, nur die Erdrotatorien und auch diese nur in eingetrocknetem Zustande. Vom Wasser umgeben sterben dieselben Rädertiere schon bei Temperaturen von etwa +50° ab, ebenso (nach Plate) merkwürdigerweise, wenn sie mehrere Tage selbst bei normalen Temperaturen ständig von Wasser umgeben sind; so sehr sind also diese Formen dem Wechsel von Feuchtigkeit und Trockenheit angepaßt.



Fig. 8. Philodina roseola Ehrb. Nach Weber. Aus Brauers Süßwasserfauna.

8c) Meer. Im Vergleich zu der Formenfülle im Süßwasser treten die Rädertiere im Meere weit mehr in den Hintergrund: nur 78 rein marine und Brackwasserformen sind bis jetzt bekannt geworden. Ausschließlich

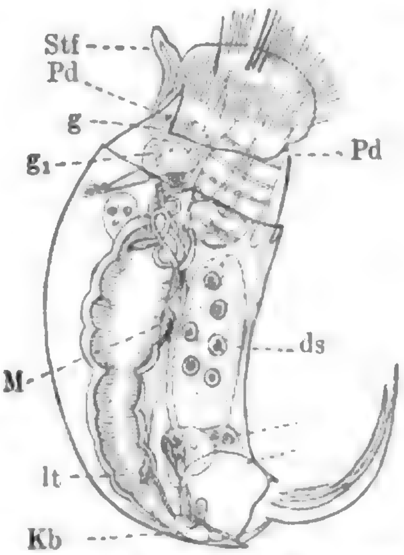


Fig. 9. Diurella porcellus Gosse. ds Dotterstock, g Gehirn, Kb kontraktile Blase, lt laterale Taster, M Magen, Pd Dorn des Panzers, R Reservoir mit ansitzenden Drüsen, Stf Tasterartiger Fortatz des Räderorgans. Nach Plate. Aus Brauers Süßwasserfauna.

auf das Meer beschränkt sind die Familie der Seisoniden, die Gattung Discopus unter den Philodiniden, dann neben einigen noch

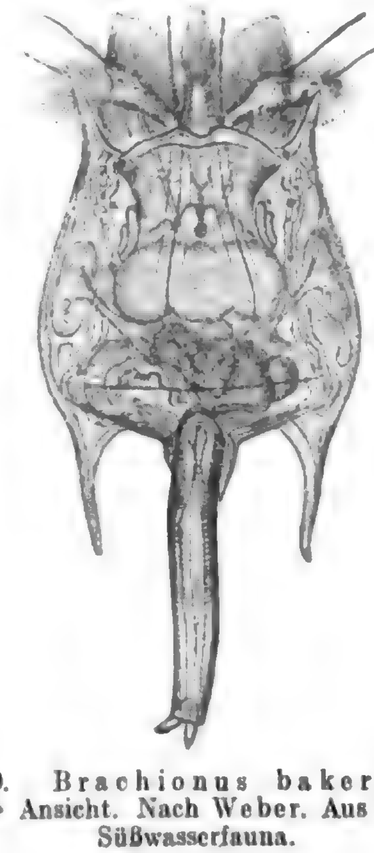


Fig. 10. Brachionus bakeri Müll. Ventrale Ansicht. Nach Weber. Aus Brauers Süßwasserfauna.

etwas zweifelhaften Gattungen Mytilia unter den Loricaten. Wie im Süßwasser haben wir auch hier litorale Formen, hauptsächlich zwischen den Algenrasen sowie auf dem Diatomeenschlick lebend, und Formen des Planktons. In letzterem scheinen eigentümliche Gattungen bis jetzt völlig zu fehlen; dagegen sind eine Reihe charakteristischer Arten vorhanden, vor allem solche der Gattung Synchaeta (S. triophthalma, S. atlantica), welche zeitweise besonders in den nordischen Meeren ziemlich häufig auftreten. Das Brackwasser zeigt eine Mischung von Salz und Süßwasserformen, welch letztere besonders im Gebiete der Ostsee eine weitere Verbreitung haben; daneben finden sich einige typische Brackwasserformen besonders in den Gattungen Synchaeta, Notholca und Anuraea.

8d) Parasitische Rotatorien. Eine Anzahl Rotatorien hat sich auch der parasitischen Lebensweise angepaßt und zwar in sehr wechselndem Grade. Als Raum-Parasiten oder vielleicht besser als Raum-Symbionten dürfen zunächst einzelne Floscularia- und Oecistes-Arten (Oe. mucicola, Oe. socialis) betrachtet werden, welche die Gallerte einiger Algen (Rivularaia, Gloeotrichia) bewohnen. Auch die oben erwähnten Callidina-Arten der Lebermoosblätter gehören hierher, ebenso Hertwigia volvocicola, die im Innern der Volvox-Kugeln haust. Ektoparasiten sind die Gattungen Seison und Paraseison, welche sich auf gewissen marinen Krebsen (Nebalia) angesiedelt haben, weiter Discopus, der auf Synapten sitzt. Im Süßwasser können Callidina socialis

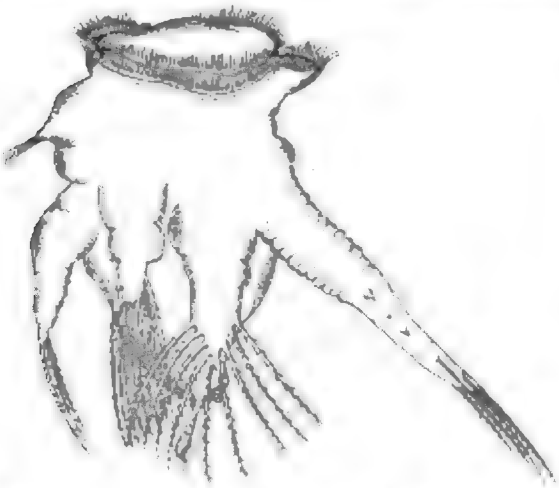


Fig. 11. Pedalion mirum Hudson. Seitliche Ansicht. Original.

und Callidina parasitica hierher gezählt werden, da sie, öfter in Anzahl, Krebse (Gammarus, Asellus) sowie Insektenlarven bewohnen; auch in der Kiemenhöhle von Süßwasserkrabben (Telphusa) kommen Callidina-Arten vor. Die Gattung Drilophagus heftet sich mit Hilfe ihres vorgestülpten Kauapparates auf der Haut von Oligochaeten fest. Zu den echten Parasiten gehört Proales Wernecki, der in den schlauchförmigen Zellen der Grünalge Vaucheria lebt und hier gallenartige Auftreibungen bewirkt, weiter die Gattung Albertia, die in der Leibeshöhle und im Darm von Oligochaeten sowie Mollusken schmarotzt.

9. System. Die Zahl der bis jetzt bekannt gewordenen Rotatorien-Arten beträgt nach Rousselet etwa 850. Dieselben lassen sich in folgendes, nach verschiedenen Richtungen hin noch recht verbesserungsfähiges System gliedern.

Klasse: **Rotatoria.**

A. Unterklasse: **Digononta.** Geschlechtsorgane paarig.
- I. Ordnung: **Seisonidae.** Männchen und Weibchen gleich gebaut. Räderorgan reduziert. Festsitzend. Seison.
- II. Ordnung: **Bdelloidea.** Körper wurmartig geringelt, Fuß fernrohrartig einstülpbar. Kiefer von ramatem Typus.
  1. Fam. Philodinidae: Rotifer, Philodina (Fig. 8), Callidina.
  2. Fam. Adinetina: Adineta.

B. Unterklasse **Monogononta.** Geschlechtsorgane unpaar.
- I. Ordnung: **Rhizota.** Weibchen meist festsitzend. Fuß stielartig ausgezogen, ohne Zehen.
  1. Fam. Floscularidae: Floscularia (Fig. 7), Stephanoceros.
  2. Fam. Apsilidae: Apsilus.
  3. Fam. Melicertidae: Melicerta, Conochilus.
- II. Ordnung: **Ploima.** Freischwimmend. Räderorgan meist gut entwickelt, besonders das Cingulum, Trochus öfter in Borstengruppen usw. aufgelöst. Meist mit Fuß.
  - a) Unterordnung: **Illoricata.** Ohne Panzer.
    1. Fam. Trochosphaeridae: Trochosphaera (Fig. 6).
    2. Fam. Asplanchnidae: Asplanchna.
    3. Fam. Synchaetidae: Synchaeta.
    4. Fam. Hydatinidae: Hydatina, Rhinops.
    5. Fam. Microcodonidae: Microcodon.
    6. Fam. Triarthridae: Triarthra, Polyarthra.
    7. Fam. Notommatidae: Notommata, Diglena, Proales.
  - b) Unterordnung: **Loricata.** Mit Panzer.
    1. Fam. Diaschizidae: Diaschiza.
    2. Fam. Rattulidae: Rattulus (Mastigocerca) (Fig. 9).
    3. Fam. Salpinidae: Salpina, Diplacidium (Diplax).

4. Fam. Cathypnidae: Cathypna, Monostyla.
5. Fam. Euchlanidae: Euchlanis, Diplois.
6. Fam. Coluridae: Colurus, Metopidia.
7. Fam. Dinocharidae: Dinocharis.
8. Fam. Pterodinidae: Pterodina, Pompholyx.
9. Fam. Brachionidae: Brachionus (Fig. 10), Schizocerca.
10. Fam. Anuraeidae: Anuraea, Notholca.
11. Fam. Ploesomatidae: Ploesoma (Gastroschiza).
12. Fam. Gastropodidae: Hudsonella (Gastropus).
13. Fam. Anapodidae: Anapus.

III. Ordnung: **Scirtopoda.** Mit borstentragenden, armartigen, muskulösen Fortsätzen. Ohne Fuß.

Fam. Pedalidae: Pedalion (Fig. 11).

Literatur. *Die Literatur über Rotatorien ist sehr reich, aber weit zerstreut. Hier sind in erster Linie nur Arbeiten zusammenfassenden Inhalts angeführt.* *Systematik:* **Ch. G. Ehrenberg,** *Die Infusionstierchen als vollkommene Organismen, 1838.* — **Hudson und Gosse,** *The Rotifera, 1886 bis 1889 (3 Bde.).* — **E. F. Weber,** *Faune rotatorienne du Bassin du Léman. Revue Suisse de Zoologie, 1898, S. 263 bis 785.* — **C. Wesenberg-Lund,** *Danmarks Rotifera. Vidensk. Medel. Nat. Forenhandl., 1899, S. 1 bis 145.* — **A. Collin, H. Dieffenbach und R. Sachse,** *Rotatoria. Brauers Süßwasserfauna Deutschlands, Heft 14, 1912.* — *Anatomie (vielfach auch Biologie):* **L. Plate,** *Beiträge zur Naturgeschichte der Rotatorien, in der Jenaer Zeitschr. f. Naturw., 1886, S. 1 bis 120.* — **Derselbe,** *Die Rädertiere (Rotatoria), in: Zacharias Tier- und Pflanzenwelt des Süßwassers, Bd. 1 (1891), S. 275 bis 322.* — **C. Zelinka,** *Studien über Rädertiere, I. Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd. 44 (1886), S. 396 bis 507; II. Ibidem, Bd. 47 (1888), S. 353 bis 458; III. Ibidem, Bd. 52 (1892), S. 1 bis 159.* — **P. M. de Beauchamp,** *Recherches sur les Rotifères. Archives de Zoologie, 4. Serie, Bd. 10 (1909), S. 1 bis 410.* — *Fortpflanzung:* **E. Maupas,** *Sur la multiplication et fécondation de l'Hydatina senta. C. R. Acad. Scienc. Paris, T. 111, 1890, S. 310 bis 312, 505 bis 507.* — **M. Nussbaum,** *Die Entstehung des Geschlechts bei Hydatina senta. Arch. f. mikr. Anatomie, Bd. 49 (1897), S. 227 bis 308.* — **R. Lauterborn,** *Ueber die zyklische Fortpflanzung limnetischer Rotatorien. Biol. Centralbl., Bd. 18 (1898), S. 173 bis 183.* — **R. C. Punnet,** *Sex-determination in Hydatina senta. Proceed. Roy. Soc. London (B), Bd. 78 (1908), S. 223 bis 230.* — **G. H. Shull,** *Studies in the Life-Cycle of Hydatina senta. Journal Exp. Zoolog., Bd. 8 (1910), Bd. 10 (1911).* — *Variation:* **R. Lauterborn,** *Der Formenkreis von Anuraea cochlearis, I. Teil. Verhandl. Naturhist.-Med. Verein Heidelberg, N. F., Bd. 6 (1901), S. 412 bis 448; II. Teil, Ibidem, Bd. 7 (1904), S. 529 bis 621.* — **H. Dieffenbach und R. Sachse,** *Biologische Untersuchungen an Rädertieren in Teichgewässern. Internat. Revue der Hydrobiologie u. Hydrographie 1912. Biolog. Supplemente, III. Serie, Heft 2, S. 1 bis 93 (auch über Fortpflanzung).* — *Marine Rotatorien:* **R. Lauterborn,** *Nordische Plankton-Rotatorien. Nordisches Plankton, Bd. 3 (1905), S. 18 bis 42.* — **C. Zelinka,** *Die Rotatorien der Plankton-Expedition. Ergebnisse der Plankton-Expedition, Bd. II (1907), S. 1 bis 79.*

R. Lauterborn.

Röt.

Die oberste Zone des Buntsandsteins (vgl. den Artikel „Triasformation").

Rowland
Henry Augustus.

Geboren am 27. November 1848 in Honesdale, gestorben am 16. April 1901 in Baltimore. Er war Professor an der John Hopkins-Universität in Baltimore. Er gab eine Methode zur Herstellung fehlerfreier Mikrometerschrauben an und konstruierte 1882 eine exakte Teilmaschine zur Herstellung von Konkavgittern, mittels derer er das Sonnenspektrum ausmaß und grundlegende Beobachtungen desselben unternahm. Auch eine sehr leistungsfähige Methode der Schnelltelegraphie mit Wechselströmen stammt von ihm.

E. Drude.

Rückenmark.
Physiologie des Rückenmarkes und des verlängerten Markes.

A. Das Rückenmark. 1. Stellung des Rückenmarkes im Gesamtnervensystem. 2. Vom peripheren Nerven zum Marke. Die Spinalganglien und die Wurzeln. 3. Der Eigenapparat und seine Leistung, der Reflex. 4. Die Erregung. 5. Die Bewegung. 6. Einige biologisch wichtige Bewegungsformen, Gang, Haltung, Fortbewegung, Abwehr u. a. 7. Der viscerale Anteil des Eigenapparates. Anhang: Sogenannte trophische Funktionen. 8. Einfluß anderer Hirnteile auf den Eigenapparat, die Stränge: a) Die Leitung der Rezeptionen zum Zwischenhirne. b) Der Einfluß der Oblongata und des Cerebellums, der tonostatische Reflexbogen. c) Einfluß des Mittelhirnes. d) Einfluß des Neencephalon. Großhirnrinde-Pyramidenbahn.

B. Die Oblongata. 1. Schlucken, Lautbildung, Kauen, Antlitzbewegung. 2. Atemzentrum. 3. Vasomotorenzentrum. 4. Herztätigkeit. 6. Speichelabsonderung. 6. Gesamtspannung der Muskeln. 7. Zuckerausscheidung im Harn bei Verletzung der Oblongata. 8. Funktion der Oliven. 9. Die Oblongatafunktion nach den Erfahrungen der Pathologie.

1. Stellung des Rückenmarkes im Gesamtnervensystem. Alle Wirbeltiere besitzen ein Rückenmark. Mit dem Kleinhirn, den Vierhügeln, einem Teil des Zwischenhirnes und dem Riechapparate zusammen bildet es den ebenfalls überall vorhandenen Komplex des Paläencephalons. Relativ spät, erst bei den Reptilien, gesellt sich hierzu ein ausgebildeteres Neencephalon, der Hirnteil, den wir gewöhnlich als Großhirn bezeichnen. Damit erlangen die Tiere andere Fähigkeiten. In dem Komplexe des Paläencephalons ist das Rückenmark der größte und allein für die Bewegungen unentbehrliche, also der wichtigste Bestandteil. Die Schlangen und die urweltlichen Riesenreptilien besitzen resp. besaßen ein so enormes Mark, daß die übrigen Teile des Nervensystems fast dagegen verschwinden. Das Rückenmark ist auch der einzige Teil des Nervensystems, der nach Abtrennung aller anderen zu selbständiger Tätigkeit fähig bleibt. Hier liegen zahllose Apparate, die so geordnet sind, daß, wenn sie angeregt werden, fertig geordnete Tätigkeiten auftreten. Diese vom Rückenmark ausgehenden Bewegungen sind vollkommen zweckentsprechende, auch wenn jeder Einfluß des Gehirnes ausgeschlossen ist. Sie erfolgen genau wie bei einem Automaten derart, daß der gleiche Reiz immer mit dem gleichen Motus beantwortet wird, daß der Reizeffekt also voraus bestimmt ist.

Die meisten dieser „Bewegungskombinationen" sind von vornherein dem Rückenmark gegebene, ererbte. Es zeigt aber die tägliche Erfahrung, daß diejenigen Tiere, welche ein Großhirn besitzen, von da aus neue Bewegungskombinationen im Rückenmark schaffen können, die dann bleiben: der Mensch lernt tanzen, das Pferd besondere Gangarten usw. Fische und Amphibien aber bleiben auf die ererbten Kombinationen angewiesen. Das Rückenmark allein scheint also nicht lernen zu können (vgl. die Einleitung zum Artikel „Gehirn").

2. Vom peripheren Nerven zum Rückenmarke. Die Spinalganglien und die Rückenmarkswurzeln. Die Rezeptionen werden zugeleitet durch die sensiblen Nerven, die sich via Spinalganglion in die Dorsalwurzeln und von da in das Mark fortsetzen. Die Bewegungsantriebe werden aus dem Rückenmarke heraus durch die Ventralwurzeln geleitet, die als motorische Nerven zu den Muskeln weiter ziehen (Charles Bell 1811, Magendie 1823). Jeder periphere Nerv enthält die motorischen und die rezipierenden Fasern aus einem bestimmten Hautgebiet oder für einen bestimmten Muskel. Wenn er in die Nähe des Rückenmarkes kommt, lagert er durch die Plexus einen großen Teil seiner Fasern total um. Es kommen dann in den Wurzeln immer die Fasern zusammen, die einem bestimmten Körpersegment — der Körper als eine Anzahl hintereinander gelagerter, je mit einem Rückenmarksstück versehener Segmentringe gedacht — entsprechen. Der Ausfall eines peripheren Nerven macht sich daher nie genau in der gleichen Zone geltend wie etwa der Ausfall einer Wurzel oder eines Rückenmarksstückes, Nervenareale und Segmentareale decken sich nicht. Während Durchschneidung eines Nerven einen Muskel, ein Hautstück total lähmt oder gefühllos macht, ist das bei Wurzelausfall nicht so, weil eben in jenes Hautstück ja auch aus anderen Wurzeln Bahnen mit dem Nerven gelangen. Ja der Ausfall einer einzigen Wurzel bleibt meist symptomlos, weil die vor und hinter ihr entspringenden, ihr Innervationsgebiet von vorn und hinten her überkappend, nun für sie eintreten (Eckhard, Sherrington u.a.). In den allermeisten rezipierenden Nerven liegen Fasern sehr verschiedener Herkunft gemischt. Da sind Bahnen aus den Wärme- und Kältepunkten der Haut, solche aus deren Tastapparaten, ferner Fasern, die Empfindungen aus Knochen, Gelenken und Muskeln zuleiten. Sorgsame Untersuchungen vorwiegend an gesunden und kranken Menschen haben das gelehrt. Auch wurde erkannt (Head), daß diese verschiedenen Empfindungswege langhin getrennt bleiben, daß man in den Rückenmarkswurzeln, dem Rückenmark selbst, ja bis hinauf in das Gehirn immer die gleiche Trennung des rezipierenden Weges annehmen darf, weil es gelegentlich Erkrankungen in all diesen Höhen gibt, bei denen die eine oder andere Rezeptionsfähigkeit ausfällt, während andere erhalten bleiben.

Alle sensiblen Nerven enden in den Zellen der Spinalganglien als außerordentlich feines Geflecht von Fibrillen um die Zellkerne. Aus dem gleichen Geflechte entspringen die Dorsal- oder Hinterwurzeln, die dann in das Rückenmark ziehen.

Das Spinalganglion nimmt vielleicht an dem Nervenprozeß gar nicht direkt Teil, die zuführenden Bahnen passieren nur seine Zellen (Steinach). Die negative Schwankung passiert das Ganglion ohne eine Verzögerung zu erleiden, wie es wohl der Fall sein müßte, sprächen die Zellen mit (Exner u. a.). Auch kennen wir keine Erscheinung im sensiblen Gebiete, die anders geartet als die Leitung der Erregung, gerade vom Spinalganglion ausginge. Eine wichtige Rolle aber spielen offenbar die um die Spinalganglienzellen sich aufzweigenden Teile des afferenten visceralen Apparates. Sie ist bei Tieren wenig studiert, aber wir wissen, daß beim Menschen sehr schwere Veränderungen der Haut unter großen Schmerzen eintreten (Herpes zoster),

wenn die Spinalganglienzellen erkranken. Die Existenz der Zelle ist nötig für die Erhaltung der sensiblen Faser und der Wurzel. Zerstört man die Zellen, so gehen beide zugrunde. Der ganze Verlauf der Wurzelfasern im Rückenmarke ist durch färberische Verfolgung der so zur Entartung gebrachten Bahnen gefunden.

Die afferenten Wurzeln teilen sich sofort nach ihrem Eintritt in das Mark in zwei Teile. Der stärkere, welcher im wesentlichen die aus Knochen, Gelenken und Muskeln stammenden Bahnen enthält, zieht direkt als „Hinterstrang" hinauf zu Kernen im verlängerten Marke, um da vorläufig zu enden. Ein immerhin recht großer zweiter Teil endet in der grauen Substanz des Markes nahe der Eintrittsstelle der Wurzel. Diese eintretenden Aeste teilen sich zunächst in auf- und abwärts ziehende Teile, die so ein größeres Stück des Markes mit Rezeptionen versehen können. Schließlich gelangen aber die Faserenden alle zu den weiter ventral liegenden motorischen Apparaten und zu Ganglienzellgruppen, aus denen Bahnen zum Thalamus und solche zum Kleinhirne entspringen. Dieser Verlauf ist für fast alle Wirbeltierklassen sichergestellt, vom Hai bis zum Menschen.

Die ventralen oder motorischen Wurzeln gelegentliche Erkrankungen der Zelle eintretenden Zelltod auch total atrophieren.

Sie sind rein effektorisch, wenn ihnen auch hier und da für eine kurze Strecke Fasern aus der benachbarten rezeptorischen Wurzel anliegen. Nur deshalb ergeben ihre Reizungen manchmal außer Bewegung auch sensible Symptome (Sensibilité recurrente, Magendie).

Aus den Rückenmarkszellen ziehen mit den Vorderwurzeln nicht nur alle Bewegungsfasern zu der quergestreiften Muskulatur hinaus, sondern auch der größte Teil der effektorischen Fasern des Sympathicus (vgl. den Artikel „Sympathisches Nervensystem"). Deshalb kann man durch Vorderwurzelreizung außer Muskelzuckung auch Gefäßverengerung, Störung der Darmbewegung, Pupillenerweiterung, Veränderungen der Haarstellung, der Schweißsekretion usw., je nach der gereizten Wurzel, bekommen.

3. Der Eigenapparat und die Reflexe. Die Endapparate für die eintretenden rezeptorischen und die Ausgangsapparate für die effektorischen Wurzeln, dann die Verbindungsfasern beider untereinander und die Zellen, welche im Rückenmarke gelegen dieses zu frontaleren Nervenzentren in Beziehung setzen, auch die vielen Längsfaserverbindungen zwischen einzelnen Höhen des Markes, all das zusammen nennen wir den Eigenapparat des Rückenmarkes.

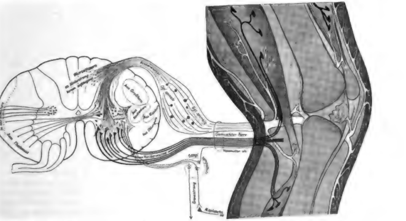


Fig. 1. Der Eigenapparat des Rückenmarkes und seine Beziehungen zur Innervation.

wachsen nicht aus den Spinalganglien in das Rückenmark ein, sondern sie entspringen aus großen Zellen, die in dessen ventralem Abschnitte liegen, und bleiben zeitlebens bis in ihre Endapparate, die Muskelendplatten, in der Art von diesen Zellen abhängig, daß sie mit dem durch

Das was der Eigenapparat leistet, kann natürlich nur an einem Marke untersucht werden, das von allen anderen Hirnzentren getrennt ist. Das ist am Frosche sehr leicht ausführbar, er kann nach der Operation Monate lang am Leben erhalten werden und deshalb ist fast die ganze ältere

Literatur über die Rückenmarksleistungen auf Versuche an diesem Tiere basiert. Bei Säugern aber kann man nur die kaudaleren drei Viertel des Markes dauernd vom Gehirne trennen. Schneidet man weiter vorn ab, so vernichtet man die Zuleitung aus der Oblongata zu den Kernen für die Atemmuskeln und kann dann nur, solange künstliche Atmung unterhalten wird, den Tod fernhalten.

Das wichtigste, was sich an einem solchen nur auf das Rückenmark angewiesenen „Spinaltiere" zeigt, ist, daß keine spontanen Bewegungen mehr auftreten, daß aber durch innere oder äußere Reize ganz bestimmte Bewegungen jedesmal mit aller Sicherheit auszulösen sind. Solchen Reizen ist das auch erregbarer gewordene Tier ohne jede Hemmung preisgegeben. Es läßt sich voraussagen, was es tun wird, wenn ein bestimmter Reiz es trifft.

Dadurch, daß sich eine besonders große Anzahl rezipierender Fasern um die Ursprungskerne der Vorderwurzeln aufzweigt und mit deren Zellausläufern ein heute noch nicht entwirrbares Flechtwerk bildet, können die anlangenden Rezeptionen auf die motorischen Apparate Einfluß gewinnen. Man kann durch momentane Reizung der Hinterwurzeln Bewegungen auslösen, die je nach der Wurzel, der Reizhöhe und Reizzeit verschieden, aber gesetzmäßig ablaufen. Wir wissen außerdem, daß dem motorischen Apparate langsam und ständig aus der Peripherie zulaufende Rezeptionen nicht zu ausgiebigem Motus, sondern zu Veränderungen der Muskelspannung führen.

Alle diese Vorgänge bezeichnet man als Reflexe. Was der Eigenapparat des Rückenmarkes leistet, sind ausschließlich Reflexe und man hat sie deshalb sehr genau studiert.

Der erste, der klar aussprach, daß die zuführenden Nerven Bewegungen zwangsmäßig erzeugen können, ohne daß das Bewußtsein damit zu tun hat, war Descartes 1650. Den Ort der Vermittelung suchte er in der Zirbeldrüse, das Beispiel, das er benutzte, war der Lidreflex. Im nächsten Jahrhundert wurde lebhaft gestritten, ob nicht statt der Zirbel alle Teile des peripheren und zentralen Apparates in Frage kämen (Willis), oder ob vielleicht der Austausch peripherer Fasern allein, wie er in dem Plexus stattfindet, zur Erklärung ausreiche (Vieussens u. v. a.). Da machte Hales ca. 1730 den abschließenden Grundversuch. Er zeigte, daß von der Haut des Frosches aus keine Reflexbewegungen mehr erzielt werden können, wenn man vorher das Rückenmark ausgebohrt hat. Erst 1837 entdeckte Grainger, daß der Uebertragungsort zwischen Reiz und Bewegung in der grauen Substanz liegt und zwei Jahre später sprach es Valentin aus, daß hier die Ganglienzellen die Hauptrolle spielen müßten. Eine ungeheuere Literatur entstand namentlich in den ersten zwei Dritteln des 19. Jahrhunderts, an der sich fast alle damals lebenden Physiologen beteiligten. Die Namen von Marshall Hales, Schiff, Pflüger seien nur genannt. 1823 zeigte Mayo, daß schon ein bestimmtes, aus den Verbindungen gelöstes Stück des Vogelgehirnes den Pupillenreflex leistet. 1825 konnte Legallois Analoges für den Atemreflex beweisen und nun mehrten sich, namentlich durch Flourens und Longet, die Angaben, welche darauf hinwiesen, daß das ganze Rückenmark aus einer Reihe von des Einzelreflexes fähigen Zentren zusammengesetzt sei. Aber erst die Arbeiten von Goltz brachten diese Tatsache zu voller Sicherheit. Zeigte dieser doch wie ein bestimmtes Stück des Markes ausreicht bei bestimmtem Reiz das Quaken auszulösen oder wie ein nur beide Vorderarme und die Wirbelsäule enthaltendes Froschstück auf entsprechende Reize hin (s. unten S. 503) genau so umklammert wie ein ganzer Frosch. Die Versuche von Tiegel und Osawa, von Bethe, Bickel u. a. haben dann für Fische und andere Vertebraten viele weitere Beispiele gebracht.

Einen Aal, einen Amphioxus, einen Salamanderschwanz, jeden Frosch kann man in eine ganze Anzahl Teile zerlegen, deren jeder noch des Reflexes fähig bleibt.

Normaliter kommen keine Bewegungen anders als auf sensible Reize hin zustande. Man hat wiederholt behauptet, daß das Rückenmark von sich aus Bewegungen erzeugen könne, daß es also Spontanbewegungen gäbe. Aber alle darauf gerichteten Untersuchungen lehren immer wieder, daß dem nicht so ist. Es handelt sich immer um von außen kommende Reize, die, den fertigen Apparat treffend, oft komplizierte und sehr zweckmäßige Bewegungen erzeugen können. Ein auf eine Glasplatte gelegter enthirnter Frosch zieht zwar zuweilen nach einiger Zeit sein Bein so, daß es anders liegt. Dabei handelt es sich aber um Bewegungen, die von der Schwere ausgelöst, durch die Gelenksensibilität recipiert entstehen. Auch der Erregungszustand des Rückenmarkes ist da sehr von Einfluß. Wohl sieht man sehr oft einen solchen Frosch nach einiger Zeit einen Sprung machen, aber der hängt nur von äußeren Ursachen ab. Auf einen Pfeiler im Keller gesetzt, trocknet das Tier langsam ein, hier springt es niemals weg (Goltz).

4. Die Erregung. Alle Reflexe werden von den rezeptorischen Wurzeln her erregt. Durchschneidet man diese, so gelingt es nicht mehr von der Haut aus oder etwa durch Veränderungen der Gliedlagen Bewegungen zu erzeugen.

Man hat gewöhnlich angenommen, daß bei den Reflexen die Uebertragung des Reizes direkt von der sensiblen Faser auf die motorische Zelle möglich sei, weil es keine Tatsache gab, die gegen diese einfachste Annahme sprach.

Verworn (1909) meint, ein Schaltstück annehmen zu müssen, weil, wenn eine sensible

Wurzel durch langes Reizen in ihrem Muskel keine Zuckungen mehr auslöst, durch Reizen der nächsten Wurzel dieser Muskel doch zum Zucken zu bringen ist. Die Ermüdung müsse in einem Schaltneuron liegen. Da aber ein Muskel von mehreren Wurzeln her erregbar ist, scheint mir diese Annahme nicht notwendig für die Erklärung der Erscheinung.

Nicht jeder Reiz erzeugt an der gleichen Stelle treffend den gleichen Reflex. Erregt man chemisch, elektrisch oder durch Wärme die Sohlenhaut eines Frosches, so zieht er das Bein zurück, berührt man sie aber leicht drückend, so spreizen sich die Zehen und der Fuß stemmt sich gegen den Druck. Beide Antwortbewegungen sind offenbar sehr zweckmäßig, die eine als Abwehr- oder Fluchtbewegung, die andere als normale Reaktion, wie sie eintreten muß, wenn das Tier gegen den Boden oder beim Schwimmen gegen das Wasser tritt.

In dem Artikel „Reflexe" wird über die allgemeinen Lebenseigenschaften der Ganglienzellen berichtet. Dort sind auch die Tatsachen der Bahnung erläutert, des merkwürdigen Phänomens, daß durch einen anlangenden Reiz die Reizbarkeit der Zellen scheinbar gesteigert wird. Das muß natürlich für die Ausführung vieler andauernder Bewegungen, wie etwa des Ganges, von der größten Wichtigkeit sein.

Ein anderes wichtiges, bei der Tätigkeit des Rückenmarkes fortwährend in Erscheinung tretendes Phänomen ist das ebendort besprochene der Hemmung. Der Nervenapparat wäre allen Reizen vollkommen preisgegeben, wenn er nicht die Eigenschaft hätte, daß jede Erregung dadurch gehemmt werden kann, daß in den sie ausführenden Apparat andere Reize gleichzeitig eintreten (Goltz). Der geköpfte Frosch führt deshalb so leicht viele Reflexbewegungen aus, weil die vom Gehirn dem Marke zufließenden Hemmungen nun ausgefallen sind. Auch aus der Peripherie können seinem Marke Hemmungen zufließen. So zieht z. B. ein solches Tier sein Bein sofort aus einer Säure heraus, es läßt es aber solange darin, als man etwa das andere Bein kneift (Freusberg). Das Tier, welches quakt, sobald man seine Rückenhaut streicht, unterläßt das, wenn gleichzeitig sein Fuß gekniffen wird.

Die auf einen Reiz zustande kommende Bewegung ist also abhängig von der Summe und von den Differenzen der gleichzeitig eintretenden Rezeptionen.

Die Rezeptionen erregen nicht nur Bewegungen, sondern sie regulieren sie auch. Das hat schon 1834 Panizza erkannt und Benedict Stilling, später Exner haben die Gründe genauer analysiert. Wenn an einem kalten Wintertage unsere Hände durchfrieren, werden sie zu geordneter Tätigkeit unfähig, trotzdem die Muskeln, welche dabei in Tätigkeit treten, warm gehalten bleiben. Aber Haut, Gelenke und Sehnen sind zur Rezeption durch die Kälte unfähig geworden. Diese sensible Regulierung kann allerdings, wenn sie etwa akut durch Abtrennen der sensiblen Bahnen ausgeschaltet ist, sich auf anderen Wegen ausgleichen. Hering, auch Bickel, wiesen nach, daß die ungeordneten Bewegungen, welche nach Durchschneiden der Hinterwurzeln in einem Glied auftreten, sich allmählich ausgleichen, solange man den Gebrauch der Augen gestattet. Ein Tabeskranker, ein Mensch, der viele Hinterwurzeln verloren hat, macht sofort die ungeordnetsten Bewegungen, wenn er die Augen schließt, oft stürzt er dabei zu Boden. Affen benutzen einen Arm, dessen Hinterwurzeln durchschnitten sind, überhaupt nur noch bei assoziierten kräftigen Bewegungen mit dem anderen Arm; allein und spontan überhaupt nicht mehr, offenbar weil die sofort eintretende Ataxie aller Bewegungen sie ungemein stört (Mott und Sherrington).

Der zuleitenden Bahnen sind immer sehr viel mehr als der effektorischen. Nach Donaldson betragen sie beim Menschen dreimal so viel. Außerdem ist eigentlich jeder effektorische Pfad von jedem eingehenden zu erregen, wenn man nur die Erregung hoch genug macht. So kann bei einem strychninvergifteten Tiere ein Krampf aller Muskeln von eigentlich jeder Hautstelle aus erzielt werden.

Ein einzelner Aufnahmepunkt kann mit einer langen Reihe von Reflexen in Verbindung stehen, sie auslösen und die Erfahrung hat gezeigt, daß je intensiver der Reiz ist, um so mehr dieser Reflexe ansprechen. Was zunächst nur eine Zuckung hervorrief, kann eine einfache, ja bei höherem Reiz eine recht zusammengesetzte Bewegung, kann gleichseitig und bei höherem Reize auch gekreuzt Bewegungen erzeugen.

Da jedem eintretenden Reize eine Anzahl von Wegen offenstehen, so ist die Annahme am plausibelsten, daß für eine gewisse Reizhöhe breitere oder sonst leichter beschreitbare Bahnen zunächst eingeschlagen werden, so daß andere Neurone vor diesem Reiz geschützt bleiben. Diese aber können erreicht werden, wenn der Reiz verstärkt wird und so auch auf sonst schwieriger zu beschreitenden Bahnen eindringt.

5. Die Bewegung. Die Fähigkeit zur Bewegung hängt durchaus ab von der Intaktheit der großen Ganglienzellen im Ventralabschnitte des Rückenmarkes. Erkranken sie, wie es bei einer Infektionskrankheit, der Poliomyelitis der Fall ist, so

tritt in den von ihnen versorgten Muskeln absolute und nie mehr zu reparierende Lähmung ein. An jeder dieser Zellen enden zahllose Nervenbahnen, von denen wir wissen, daß sie aus den verschiedensten Abschnitten des Nervensystemes, aus dem Großhirne, dem Kleinhirne, den Hinterwurzeln stammen. Alle können sie deshalb beeinflussen.

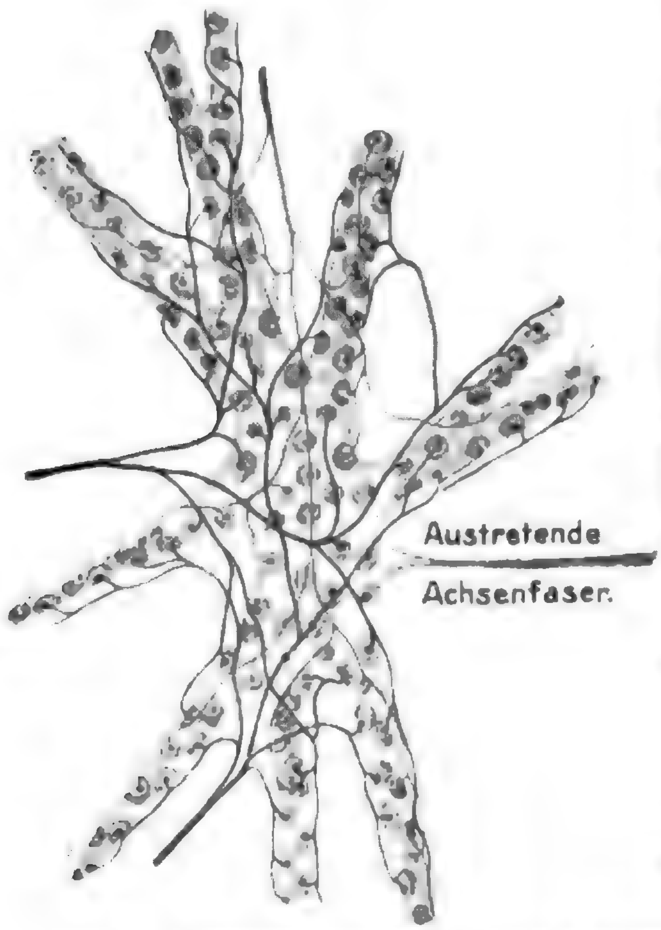


Fig. 2. Vorderhornganglienzelle, um die andere Nervenbahnen enden. Halbschema. Nach H. Heidenhain.

Die motorische Nerven aussendenden Zellen sind zu oft sehr langgestreckten Gruppen vereint, die man, weil sie je einen Muskel oder eine Gruppe von solchen versorgen, als Muskelkerne bezeichnet. Die einfachste Annahme ist heute die, daß in jenen Zellen aufgespeicherte Kraftquellen durch den anlangenden Reiz zu einer Art von Entladung gebracht werden. Dadurch wird der Muskel zur Kontraktion gebracht, er zuckt oder verkürzt sich langsam tonisch.

Das Rückenmark des Menschen und zum Teil das des Hundes sind so genau studiert, daß wir die Lage ziemlich aller Einzelkerne für die Muskeln kennen und genau wissen, durch welche einzelne rezeptorische Wurzeln diese Kerne erregt werden. Der Arzt bestimmt oft genug die Höhe eines Krankheitsherdes im Rückenmarke nach den Muskeln, deren Funktion ausgefallen ist und dem Ausfallsfeld auf sensiblem Gebiete (Head, Kocher, Wichmann, Edinger u. a.).

In der Regel wird eine einzelne Erregung, etwa eine durch den elektrischen Strom zugeführte, nur mit einer einzelnen Bewegung beantwortet. Es gibt aber eine ganze Anzahl Reflexe von ausgesprochen rhythmischem Charakter. Hier wiederholt sich trotz einmaligem Reize die gleiche Bewegung mehrmals. So ruft z. B. Streichen der Fußsohle bei dem enthirnten Hunde eine mehrfache und deshalb für den Gang des normalen Tieres wichtige Streckung des Beines hervor. Ebenso erzeugt bei solchen Tieren eine Berührung des Rumpfes in einem bestimmten sattelförmigen Gebiete mit solcher Sicherheit ein mehrmaliges Kratzen mit dem gleichseitigen Beine, daß Sherrington gerade diesen „Kratzreflex", der ja für die Abwehr der Parasiten wichtig sein muß, benutzen konnte, um überhaupt das Wesen der Reflexe genauer zu studieren. Zwischen den einzelnen Phasen solcher wiederholter Reflexe liegt eine Art Hemmung, eine „refraktorische Phase".

In den Muskelkernen müssen Verknüpfungen vorliegen, die es ermöglichen, daß ein anlangender Reiz gleichzeitig auf einzelne Muskeln erregend und auf andere, diejenigen, die ihnen entgegenarbeiten, die Antagonisten, hemmend wirkt (Sherrington), denn man erreicht durch die gleiche Reizung Kontraktion der Strecker und Relaxation der Beuger. Ja diese Vorgänge sind oft derart alternierend, daß bei Zusammenziehen der Beuger eines Beines nicht nur dessen Strecker erschlaffen, sondern auch die Strecker des anderen Beines zum Zusammenziehen und dessen Beuger zum Erschlaffen gebracht werden. Man nennt derlei Reflexe, wo die eine Bewegung eine andersseitige auslöst, alternierende.

Ganz gewöhnlich sind die Bewegungsmechanismen, wie man mit Exner diese aus Muskelkernen zusammengesetzten Apparate nennt, so geschaltet, daß nach Ablauf einer Bewegung durch die nun veränderte Lage sofort eine andere erregt wird. Dadurch entstehen Kettenreflexe, wie wir sie etwa beim Trab des Hundes oder besser noch beim Kriechen der Schlange sehen.

Man kann die von der Außenwelt her erzeugten Reflexe mit Sherrington als exterozeptive abtrennen von solchen, die durch Rezeptionen aus den bewegten Teilen selbst entstehen, den propriozeptiven. Auf die Wichtigkeit dieser letzteren Art von Reflexen für alle Bewegungen, die zuerst Claude Bernard bemerkt hatte, hat in zahlreichen Experimentalreihen namentlich Sherrington hingewiesen. Zunächst wird

die Länge, die Spannung der Muskeln durchaus von den Rezeptionen reguliert, die ihren Bewegungskernen aus den Muskeln selbst, den Knochen und Gelenken zufließen. Durchtrennung der diesen Zufluß vermittelnden Hinterwurzeln läßt die Muskeln erschlaffen und länger werden (Brondgeest, Cyon und Tschirieff und viele andere). Spannt man am enthirnten Hunde den Beinstrecker ein wenig an, so tritt eine tonische Verkürzung in ihm ein. Es verkürzt sich natürlich auch am normalen Tier bei gleicher Beinstellung der gleiche Muskel, und gibt man ihm durch Dehnen eine andere Länge, so wird diese wieder auf dem propriozeptiven Bogen auch sofort tonisch festgehalten. Diese Verlängerungs- und auch Verkürzungsreaktionen des Muskels spielen natürlich beim normalen Gang regulierend die allergrößte Rolle.

Bei diesen so gut geordneten Bewegungen spielt aber auch das oben erwähnte Phänomen der Hemmung eine wichtige Rolle. Eine Rezeption, welche den Apparat für die Beuger eines Gliedes trifft, hemmt regelmäßig den Tonus für die Streckmuskeln. Werden also die ersteren zur Kontraktur gebracht, so erschlaffen die letzteren. Diese Reflexe treten vorwiegend auf mechanische Reize hin ein, wie sie ja beim Gang die normalen sind.

Durch die Rezeptionen von der Außenwelt und die gleichartigen aus den in ihrer Lage veränderten Gliedern kommen also recht komplizierte und durch den im Rückenmark vorhandenen Apparat bereits gut geregelte Bewegungen zustande.

Als man die Gesetze, denen sie unterliegen, näher studierte, fand man, daß schon die Ausgangslage, also die Muskelspannung, die ein Glied hat, wenn es die Bewegung beginnt, bestimmend ist dafür, welche Bewegung es auf einen äußeren Reiz hin ausführen wird.

Drückt man die Zehenballen eines herabhängenden Hundebeines oder auch nur eine bestimmte Hautstelle an dessen Oberschenkel, so beugt sich das Bein, wenn es gestreckt war oder es streckt sich, wenn man an einem gebeugten Beine operiert hatte. Ausgehend von Arbeiten Uexkülls hat Magnus es sehr wahrscheinlich gemacht, daß die gedehnten Muskeln leichter auf den Reiz ansprechen und daß darauf jene Verschiedenheit der Reizerfolge je nach der Körperlage beruht. Er hat dazu die Bewegungen studiert, die ein Katzenschwanz ausführt, je nachdem man ihn vor der Reizung krümmt, und er hat das auch für die Beinbewegung des Hundes durchgeführt. Daß ein frei an den Achseln gehaltener Rückenmarkhund leicht Laufbewegungen mit den Hinterfüssen ausführt, ist seit Goltz' und Freusbergs Versuchen bekannt. Diese Bewegungen werden durch die Spannung der Gelenke selbst ausgelöst und sistieren, wenn man die Beine unterstützt. Ließ Magnus einen so unterstützten Oberschenkel fallen, so beugte sich sofort das anderseitige Bein; hatte man es aber vorher schon stark gebeugt, so trat jetzt eine Streckung auf den gleichen Reiz hin ein.

Auch durch Reize von ganz entfernten Stellen können Reflexe anders ablaufen. So bleibt der Kratzreflex einseitig, solange der spinale Hund ruhig liegt, er tritt aber im anderseitigen Bein ebenfalls auf, wenn man das Tier in die Flanke drückt oder auch andere Körperteile in der Lage ändert. Diese Umstellungen ändern die Reizschwelle, welche also nur eine relative Höhe hat (Magnus).

6. Biologische Bedeutung des Eigenapparates. Lokomotion, Abwehr und anderes. Die mannigfachen vom Rückenmarke her auslösbaren Kombinationen von Bewegungen, die alle auf dort liegenden Apparaten beruhen und in fest gefügter Ordnung, wenn angeregt, ablaufen, dienen natürlich vital wichtigen Zwecken. Am besten studiert ist die Fortbewegung. Weiß man doch schon seit dem Altertum, daß geköpfte Vögel noch laufen und flattern und ist doch längst bekannt, daß der geköpfte Frosch mit den Rückenmarkapparaten allein zu hüpfen und zu kriechen vermag. Allerdings darf man auch hier die Leistung nicht überschätzen und nicht übersehen, daß Bau und Anlage der Extremitäten sie vorbereiteten und sehr erleichtern. Wenn man einen Frosch, der gar kein Rückenmark mehr hat, dem auch die Beinnerven durchschnitten sind, richtig wie einen lebenden hinsetzt und einen Induktionsschlag durch ihn führt, dann ist die Bewegung, welche dieses Tier macht, ein richtiger Sprung, ja es kann nach Art der Knochen und Muskeln gar keine andere zustande kommen als eben der Sprung (Kreidl). Die Reizung eines Schlangenmarkes wird immer ein Krümmen erzeugen, weil eben die Muskulatur jede Reizung nur damit beantworten kann. Es scheint, daß alle Bewegungen, die ein Tier regelmäßig und in gewissem Rhythmus oder in gewisser Kombination sehr oft auszuführen hat, in solchen fertigen peripheren und zentralen Apparaten angelegt sind und es bedarf allemal nur des adäquaten Reizes, um sie auszulösen. Man braucht einem durch Kälte reizbarer gemachten Frosche nur die Sohlenhaut etwas zu pressen, wie es ja auch der Wasserdruck tut, um ihn einige richtige Schwimmstöße ausführen zu sehen und wenn man einem Triton alpestris (Luchsinger) das Vorderbein kitzelt, so schreitet das gekreuzte Hinterbein richtig aus wie zum Gange. Die geköpfte Schlange ringelt sich wie eine normale um den Arm des Experimentators, wenn dieser sie am Halse festhält und sie zieht ihre Touren enger, wenn dieser den Druck verstärkt

(Tiegel und Osawa). Diese Versuche glücken nicht mehr (Exner), wenn man die Bauchschilder entfernt. Ist das Tier sich selbst überlassen, so ringelt es sich wie ein normales ein. Der geköpfte Aal schwimmt schlängelnd wie ein normaler davon und auch ein spinaler Hai schwimmt ganz wie ein normaler. Dabei kommt allerdings in Betracht, daß seine Rumpfformation so ist, daß auch ein toter Hai ziemlich normale Stellung einhält (Bethe). Die geköpfte Schildkröte zieht, wenn berührt, wie die normale Schwanz und Beine ein, wandert auch wohl von Schwerereizen getrieben, gelegentlich umher (Fano).

Bei den Vögeln ist noch mehr über die rein spinale Regulierung des Ganges und des Fluges bekannt als die alte Tatsache, daß geköpfte noch fliegen, besonders durch Singer und Trendelenburg. Es genügt, eine geköpfte Taube auf den Rücken zu legen oder auch nur zum Teil um die Achse zu drehen, um sofort veränderte Stellung der Füße und Spreizen der Schwanzfedern zu sehen, wie sich auch sonst vielerlei abnorme Bewegungen in den Flügeln und Beinen solcher Tiere zeigen. Diese Bewegungen werden wahrscheinlich durch die veränderten Gewichts- und Lageverhältnisse der Eingeweide erregt, denn nach Durchschneiden der Lumbalwurzeln, welche die Rezeptionen aus den Eingeweiden vermitteln, hören sie auf. Derlei ist natürlich bei einem fliegenden Tiere mit labiler Statik ungemein wichtig. Auch das Ausschreiten ist fest angelegt. Beugen des einen Beines oder auch nur ein Druck auf dasselbe erzeugt sofort Strecken des anderen und umgekehrt. Die geköpfte Ente macht zweckmäßig koordinierte Schwimmbewegungen (Tarschanoff), wenn die Beine in Wasser getaucht, ja wenn nur deren Federn berührt werden. Berührung der Rückenfedern hemmt das sofort. Preßt man einen Fuß, so bewegt sich auch der entgegengesetzte und es tritt Steuerbewegung des Schwanzes nach der gepreßten Seite hin auf. Alles das bleibt, wenn auch nur das Lendenmark erhalten ist.

Für die Regulierung des Ganges des Hundes sind oben schon eine ganze Anzahl Daten gegeben. Diese Reflexe am Hunde mit durchschnittenem Rückenmarke gewannen überhaupt erst an Interesse, als Goltz und Freusberg zeigten, wie sie ausschließlich dem Gange dienen. Seit Freusberg nachwies, wie ein solcher frei unter den Achseln gehaltener Hund eine Reihe von Laufbewegungen macht, ist eine sehr große Literatur entstanden (Sherrington, Philippson und viele Andere). Sherrington untersuchte die Ursachen dieser Bewegungen und fand, daß sie von dem Gewichte der Beine ausgelöst werden, daß sie sistieren, wenn man den gebeugten Oberschenkel unterstützt. Läßt man statt des Gewichtes den Druck auf die Sohle wirken, wie es beim normalen Gange ja vorkommt, dann sieht man oft das ganze Bein sich wie zum Laufe zusammenbeugen und dann zum Absprunge strecken. Diese sonst schlaffen Tiere können aufgestellt infolge der eintretenden Spannungen oft eine kurze Zeitlang stehen. Die durch Druckreize auslösbaren Bewegungen abwechselnd des einen Vorderbeines nach vorn und des gekreuzten Hinterbeines nach hinten sind der Trabbewegung normaler Hunde ganz gleich, wie sich an chronophotographischen Aufnahmen zeigen läßt. Bei Affen liegen die Verhältnisse wesentlich anders. Jedes ihrer Glieder, ja auch der Schwanz wird zu den mannigfachsten Bewegungen gebraucht und diese erfordern oft via Augen und statischen Apparat eine ganz besondere Regulierung. Ein Apparat wie bei dem gleichmäßig trabenden Hunde, dem ohne Variation dahinfliegenden Vogel ist da sicher sehr versteckt hinter zahlreichen anderen zu gutem Teile gar nicht im Rückenmark sitzenden Apparaten. Sherrington fand denn auch von kombinierten Reflexen recht wenig Sicheres, etwa Beugung des gereizten mit gleichzeitiger Streckung des anderseitigen Hinterbeines, dann Adduktion und Flexion der Hand- und Fußdaumen, wenn deren Volarseite gereizt wurde.

Es sind also im Rückenmarke schon Apparate vorhanden, die unter Umständen, wenn der Fuß nur auf den Boden tritt, die ganze weitere Laufbewegung auslösen wie ein Uhrwerk.

Wenn nun auch der Eigenapparat des Rückenmarkes vollkommen ausreicht, die Lokomotion der auf dem Bauche oder im Wasser sich bewegenden Tiere im wesentlichen zu gewährleisten, so genügt er doch nicht dafür bei den auf vier Beinen wandelnden Säugern. Ein Hund mit durchschnittenem Marke kann zwar noch etwas auf die Hinterfüße gestellt werden, aber er fällt dann leicht um, die Beine gleiten rückwärts oder seitwärts aus. Was hier fehlt, ist der Gesamttonus der Muskeln, die Spannung aller derjenigen, die zur Aufrechterhaltung des Körpers notwendig sind. Nach Untersuchungen von Sherrington kommt auch sie auf reflektorischem Wege zustande, aber es wirken dabei Hirnteile mit, die weit frontal liegen. Ein Schnitt hinter den vorderen Hügeln vernichtet diesen „Statotonus“ nicht, wohl aber ein solcher kaudal von der Brücke. Da Wegräumung der Labyrinthe den Stand wohl stört, aber nicht vernichtet, so kann es sich nur um Einflüsse vom Kleinhirne her handeln. Bei Besprechung der Kleinhirn-Rückenmarkbahnen (siehe unten, 8b) wird davon zu handeln sein. Auch das Stehen

beruht übrigens auf reflektorischen Prozessen, denn Wegnahme der Hinterwurzeln vernichtet es sofort.

Magnus und de Kayser konnten zeigen, daß dieser Gesamttonus der Körpermuskulatur in gewissem Grade von der Kopfstellung abhängt, daß er sich mit deren Aenderung auch ändert. Die Spannung der Nackenmuskulatur, welche hier in erster Linie ausschlaggebend ist, hängt wieder von der Lage der Labyrinthe zum Raume ab. Diese Einrichtung ist biologisch wichtig. Bei der Katze, die nach der Maus blickt, spannen sich automatisch die Sprungmuskeln.

Aus dem Vorhergegangenen ersieht man, daß die Hauptmasse der Rückenmarksapparate der Lokomotion dienen, aber natürlich sind auch für die anderen Verrichtungen zusammengesetzte Verbindungen gegeben.

Eine ganze Anzahl Reflexe dienen der Abwehr und da sie besonders leicht erzeugbar sind, sind sie vielfach zum Studium der Reflexgesetze gerade benutzt worden. Längst bekannt ist, daß der geköpfte Frosch, wenn er irgendwo mit Säure betupft wird, dorthin das Bein zum Abwischen wendet. Dann ist viel studiert der Kratzreflex. Ein spinaler Hund kratzt sich mehrmals, wenn in einem bestimmten sattelförmigen Bezirke des Rumpfes ihm nur ein Haar berührt wird.

Manche Reflexe, die ganz speziellen Zwecken dienen, kommen nur zustande, wenn jene erfordert werden. So jener Umklammerungsreflex der Froschmännchen. In deren Halsmark liegt ein Apparat, der, wenn er im Frühjahre erregt wird, besonders durch die Haut eines Weibchens erregt wird, zwangsmäßig die Arme um jenes schließen läßt. Man kann (Goltz) dann den Kopf und das ganze übrige Rückenmark abschneiden und erhält immer noch von dem kleinen Ring, der ein Stückchen Wirbelsäule und beide Arme enthält, den Umklammerungsreflex.

Einzelne Reflexe haben für die Aerzte große praktische Wichtigkeit gewonnen, weil aus ihrem Fehlen auf Störungen geschlossen werden kann. Hier stehen in erster Linie die Sehnenreflexe. Sie kommen normaliter beim Schritt und Stehen durch die Muskelspannung selbst als propriozeptive Reflexe zustande. Aber natürlich kann man sie auch exterozeptiv erzeugen, wenn man etwa den Unterschenkelstrecker durch einen Schlag auf seine Sehne oder den Wadenmuskel durch rasche Ueberstreckung des Fußes dehnt. Dann ziehen sich diese Muskeln lebhaft zusammen. Der künstlich erzeugte Kniesehnenreflex ist sehr genau studiert worden, weil bei manchen Krankheiten der zuleitende (Tabes) oder der vermittelnde (Myelitis) oder der hemmende (Großhirnaffektionen) Apparat leidet, und ein Studium des Reflexes eben auf jene Fehler hinweist. Die Zeit, die er braucht, beträgt (Schewen) 0,01 Sekunde mehr, als diejenige, welche vergeht, bis ein elektrisch gereizter Muskel zuckt. Für Hin- und Rückweg und Reflex bedarf es etwa 0,03 Sekunden. Die Zeitangaben der einzelnen Autoren variieren sehr.

Natürlich haben die verschiedensten Tiere noch speziell ihrer Lebensführung angepaßte, wohl erworbene Reflexe. Sie alle anzuführen, würde zu weit führen, erwähnt sei aber der merkwürdige „Autotomiereflex" der Eidechsen. Ergreift man ein solches Tier am Schwanze auch nur leicht, so stößt es diesen direkt ab, als ob es bestimmte Muskeln durchrisse. Dieser Vorgang soll nach Zerstörung des Lendenmarkes nicht mehr zustande kommen.

Während man früher annahm, daß beim Menschen nach Rückenmarksabtrennung sich alle Reflexe steigerten, zeigten Bruns, Bastian u. a., daß bei totalen myelitischen Unterbrechungen das nicht der Fall sei, daß sogar die Sehnenreflexe erlöschen. Aber da mehrere Fälle bekannt sind, namentlich reiner Durchschneidungen, die für die ältere Auffassung durchaus sprechen, wird es wahrscheinlich, daß in den meisten Fällen eine von der Narbe ausgehende Hemmung die Reflexe unmöglich macht.

7. Der viscerale Anteil des Eigenapparates (siehe auch den Artikel „Sympathisches Nervensystem"). Alle die bisher geschilderten Leistungen des Rückenmarkeigenapparates betreffen die quergestreifte Muskulatur, sie sind somatische. Im Rückenmarke ist aber auch ein für die viscerale Innervation bestimmter Abschnitt und dessen Leistungensind ebenfalls bekannt.

Im Winkel etwa, den die motorischen Vordersäulen mit den rezeptorischen Hintersäulen bilden (Fig. 1), liegen einige Zellgruppen, die ihre Fasern im wesentlichen mit den Vorderwurzeln hinaussenden in die vom Sympathikus und vom autonomen System innervierten Organe. Diese Rami communicantes ermöglichen die Einwirkung des Gehirnes und anderer Zentralapparate auf die sympathischen Funktionen. Daß diese Funktionen auch zustande kommen, wenn der Sympathikus isoliert ist, das ist durch sehr viele Versuche nachgewiesen, aber natürlich kann man durch Reizung der vorderen Wurzeln, von denen ein Teil in den prävertebralen Ganglien des Sympathikus endet, die Funktionen des Sympathikus erregen. So bringt Reizung der zweiten Thorakalwurzel — die Höhenzahlen schwanken für die einzelnen Tierarten — die Pupille zur Erweiterung, so läßt sich von vielen Wurzeln her Schweißsekretion erregen und so üben vor allem Reizungen der aus dem 2. bis 4. Sakralsegmente entspringenden Wurzeln mächtige Einflüsse auf Blase, Mastdarm und Geschlechtsteile. Die Blase kann zur Kontraktion, der Darm

zur Entleerung, der Penis zur Erektion gebracht werden. Ich sah eine Frau mit total getrenntem Rückenmarke gebären. Sie fühlte gar nichts davon, hatte aber durch den Hinabtritt des Kindes sehr kräftig ausgelöste Uteruszusammenziehungen. Das gleiche berichtet Goltz von Hunden. Man nimmt deshalb in jener Höhe des Sakralmarkes „Zentren" für Blase, Mastdarm und Geschlechtsteile an. Es ist (Goltz und Ewald) bekannt, daß ein Hund ohne Lendenmark seine Blase noch entleert, wenn sie übervoll wird, den Darm ebenso und daß er sogar (L. R. Müller), zu einer Hündin gebracht, erigiert und Sperma entleert. Freilich die anderen peripheren Nerven und auch das Gehirn, die im Gesamtorganismus so vielfach auf die Verrichtungen jener Organe einwirken, sind dann ausgeschaltet, eine andere als eine direkte periphere Erregung ist nicht mehr möglich.

Zu dieser visceralen Innervation der Beckenorgane kommt aber für Blase, Darm und Genitale etwa aus der gleichen Gegend noch eine andere, welche gerade so wirkt, wie die übrigen motorischen Nerven. An sie knüpfen Leitungsbahnen aus dem Großhirn usw. an. Die Innervation der Beckenorgane vom Rückenmark her ist also eine doppelte, eine viscerale und eine somatische.

Gewebserhaltung. Trophischer Einfluß. Die propriozeptiven Reflexe scheinen von besonderer Wichtigkeit für die Erhaltung der Gewebe zu sein. Die Pathologie zeigt mit aller Sicherheit, daß Gewebe, die nicht fungieren, dem Schwunde verfallen. Nun hat man längst beobachtet, daß die Muskeln, welche vom Rückenmarke getrennt sind, stark atrophieren, daß die anderen Gewebe sehr vulnerabel werden und daß vielfach bei Tieren mit Nervenabtrennung Zerfall der Haut und Weichwerden der Knochen eintritt. Die früheren Beobachter glaubten eine spezielle trophische Funktion des Markes dieser Erscheinungen wegen annehmen zu müssen. Es genügt aber zu ihrer Erklärung durchaus die Annahme, daß ein Untergang eintritt, weil keine propriozeptiven Gewebsreflexe mehr zustande kommen, ein Untergang zu gutem Teile durch Nichtgebrauch. Sicher gibt es auch Reflexe, die abwehrend vor Gewebsschädigungen bewahren. Ein Patient mit totaler Anästhesie der Sohle bekommt, wenn man diese nicht schützt, bald tiefe Geschwüre weil er vor abnormem Druck nicht mehr zurückweicht. Für die Knochen ist die Abhängigkeit von den Nerven oft bestritten worden. Sie ist endgültig von Goltz bewiesen. Als dieser einem Hunde während eines Jahres in mehreren Sitzungen das Rückenmark stückweise entfernte, wurden die Wirbel so weich, daß er bei der letzten Operation die noch stehenden Bögen mit einer Schere aufschneiden konnte.

8. Der Einfluß anderer Teile des Nervensystems auf den Eigenapparat. Die Rückenmarkstränge. Die Rezeptionen, welche in das Rückenmark gelangen, erregen nicht nur dort Bewegungskombinationen, sondern sie verbreiten sich zum Teil weiter frontalwärts auf das Kleinhirn, das Mittelhirn und vor allem auf einige Kerne im ventralen Thalamus. Von einigen dieser Stätten gehen dann wieder Bahnen in das Rückenmark hinunter, dessen Apparat erregend. Man kann sich das Ganze als weiter ausgreifende Reflexbogen vorstellen. Auch andere als die Spinalnerven können die im Rückenmarke vorhandenen Bewegungskombinationen zur Tätigkeit anregen oder die begonnene Tätigkeit hemmen. Jede Eidechse, die in gleichartigem Schritte davonraschelt, wenn mein Schatten sie trifft, mein eigenes reflektorisches Ausbiegen vor plötzlich auftauchender Gefahr zeigt das.

Die Rückenmarkstränge, welche diese Verbindungen vermitteln, sind viel studiert.

Man hat schon früh (Bell, Magendie, Longet) festgestellt, daß in den Hintersträngen sensible Bahnen liegen und daß den Vordersträngen für die Bewegungsleitung Wichtigkeit zukomme. Das letztere suchte dann in glänzender operativer Technik Schiff zu beweisen, der auch fand, daß die Hinterstränge der Tastempfindung dienten, während Schmerzempfindungen durch die graue Substanz geleitet würden. Zu ähnlichem Resultat scheint Brown-Sequard gekommen zu sein. Mit vervollkommneterer Technik arbeiteten Ludwig und Woroschiloff. Für sie lagen die Verbindungen motorischer und sensibler Art wesentlich in den Seitensträngen, weil sie nach Durchtrennung der Hinter- und Vorderstränge beide Qualitäten nicht wesentlich gestört fanden. Brown-Sequard, Schiff, Osawa, Weiß haben dann festgestellt, daß ein Teil der sensiblen Fasern im Marke aufwärts ziehend kreuzt. Fast allen diesen Untersuchungen fehlt die anatomische Nachprüfung und erst neuerdings werden Rückenmarkexperimente mit derjenigen Exaktheit und anatomischen Nachkontrolle angestellt, die zu sicheren Resultaten führen kann (Sherrington, Rothmann u. a.).

Zwei merkwürdige Unterlassungssünden haben den Fortschritt auf diesem Gebiete lange gehemmt. Einmal hat man immer Physiologie getrieben ohne Rücksicht auf das von der Anatomie Konstatierbare zu nehmen und dann hat man nur an Tieren untersucht und die zahlreichen Ergebnisse, welche die Beobachtung am Rückenmarke verletzter Menschen hätte bringen können, in der speziellen Fachliteratur ignoriert. Sogar die Grundtatsachen hätte man leichter gefunden, wenn man von der Beobachtung am Menschen ausgegangen wäre, der ja mindestens für die Gefühlsbahnen viel klarere Auskunft geben kann als das Tier.

Die anatomische Verfolgung der Leitungsbahnen zeigt, welche Anfangs- und Endgebiete sie verknüpfen und da feststeht, wo im Ausgangsgebiete die rezeptorischen und effektorischen Apparate liegen, so läßt sich

schon hieraus auf die Leitung ein Schluß machen. Die physiologische Leitung findet — hier bestätigt der Versuch durchaus die Anatomie — immer in der Richtung statt, welche von der Ursprungszelle wegführt. Diese Richtung ist nun leicht zu bestimmen.

Man braucht nur einen Schnitt in das Nervensystem zu machen, dann zerfallen alle von ihren Ursprungszellen getrennten Fasern bis in ihre letzten Endverzweigungen. Dieser Zerfall läßt sich leicht optisch und chemisch nachweisen. Zerstört man z. B. die Kernsäule, in welcher ein medialer Teil der Hinterwurzeln endet, so entartet ein Faserzug bis in die Rinde des Kleinhirnes, der an der Peripherie des Markes einherzieht, der Tractus spino-cerebellaris. Und zerstört man die Gegend der Zentralwindungen am Großhirne, so entartet ein Faserzug aus der Hirnrinde bis hinab in das Lendenmark, dessen ganzen Verlauf samt seiner Kreuzung an der Basis der Oblongata man leicht feststellen kann. Dieser Zug verdient deshalb den Namen Tractus cortico-spinalis. Natürlich bringt ein Schnitt quer durch das ganze Mark alle aus diesem aufwärts ziehenden Fasern frontal von der Schnittstelle zum Zerfall, weil sie ja hier von ihren Ursprungszellen getrennt sind und ebenso entarten kaudal von diesem Schnitte alle aus dem Gehirne stammenden Fasern. Auf diesem Wege, ebenso auf dem der Verfolgung der Markscheidenentwickelung ist es durch hunderte von Arbeiten gelungen, die ganze den Eigenapparat umgebende Markfasermasse in einzelne nach Anfang und Ende wohl bekannte Stränge zu zerlegen.

Die Leitung in den einzelnen Strängen ist auch schon dadurch untersucht worden, daß man sie direkt reizte und die entstehende negative Schwankung an entfernteren Stellen studierte (Gotsch und Horsley, Gad und Flatau).

Die in den Strängen liegenden Verbindungen des Eigenapparates sind auf ihre Funktion hin nur bei den Säugern genauer untersucht. Da aber kein Grund zu der Annahme vorliegt, daß die gleiche Bahn bei verschiedenen Vertebraten verschiedene Funktion habe, so sei erwähnt, daß folgende Verbindungen bei allen Vertebraten vorkommen: Zu- und abführende Wege zum Kleinhirne, zuführende und abführende zum Mittelhirne, zuführende zu dem Zwischenhirne. Die Säuger allein besitzen dann noch eine direkt aus dem Großhirn herabführende und am meisten beim Menschen entwickelte Bahn. Die langen Bahnen, die aus dem Rückenmarke heraus oder in es hineinführen, vermitteln seinem Eigenapparat die Tätigkeit weiter frontal gelegener Eigenapparate. Welcher Art diese Einflüsse sind, das wird für die einzelnen zu studieren sein. Hier sei zunächst erwähnt, daß das vom Gehirn total abgetrennte Mark nach einer kurzen Refraktärperiode meist sehr viel erregbarer wird. Das Tier wird allen möglichen Reizen ohne Widerstand preisgegeben, es bleibt eben der Eigenapparat des Markes ganz ohne die Hemmungen, die er von frontaleren Zentren her erhält. Sherrington und Hering haben nachgewiesen, daß alle Bahnen die Erregungen zuführen, wenn entsprechend gereizt, auch das Zustandekommen spinaler Bewegungen hemmen können. Zahllose Beobachtungen sprechen dafür, daß mit dem Isolieren des Markes im wesentlichen solche Hemmungen wegfallen. In einzelnen Fällen ist es auch gelungen, den Ausgangspunkt der Hemmungen zu lokalisieren. So quakt z. B. ein Frosch, so oft man über seinen Nacken streicht (Goltz), wenn man ihn von dem hemmenden Einflusse des Großhirnes befreit hat, auch wenn man nur die Optici abtrennt (Langendorf). Natürlich muß Abtrennung aller Hirnteile zwischen der Optikusendigung und dem Rückenmark den gleichen Erfolg haben, wie denn auch der Versuch erweist.

Neugeborene Menschen, bei denen die Hirnbahnen zumeist noch marklos sind, sind abnorm reflexerregbar (Soltmann), auch Schildkröten mit isoliertem Rückenmarke wandern oft ruhelos hin und her (Fano).

Wenn nun auch ein hemmender Einfluß von den frontaleren Hirnteilen auf das Rückenmark vielfach nachgewiesen ist, so lassen doch Versuche von Munk und neuerdings solche von Trendelenburg es sehr wahrscheinlich erscheinen, daß die Erregbarkeit, mindestens für bestimmte Funktionen, auch vom Gehirn her ständig etwas gesteigert ist. Nach der reizlosen Unterbrechung der Hirnrückenmarkverbindung, wie sie ein um das Rückenmark gelegter Kältekreis schafft, sinkt die Erregbarkeit für den Beugereflex des Beines.

8a) Leitung des von der Peripherie her Rezipierten durch die Hinterstränge und die Vorderseitenstränge zum Zwischenhirn. Die Hinterstränge des Markes bestehen ausschließlich aus aufsteigenden Wurzelfasern, sie gehören also weniger dem Leitungsapparate an als dem Eigenapparate. Es liegen sehr viele Untersuchungen nach Durchschneidung vor. Am genauesten kennen wir da die hirnwärts geleiteten Rezeptionen vom Menschen, wo die häufigste Rückenmarkerkrankung, die Tabes, gerade diese eintretenden und aufsteigenden Wurzeln trifft, dann aber auch weil wiederholt Stichverletzungen hier besser untersucht werden konnten, als das bei den keine Auskunft gebenden Tieren möglich ist. Beim Menschen sind in den Hinterwurzelelementen, die im Hinterstrange liegen, fast ausschließlich solche enthalten, die den Rezeptionen aus Muskeln und Gelenken dienen, vielleicht aber auch wenige dem Tastsinne dienende. Bei Hunden scheinen (Marshall Hall, Bickel) auch Temperaturrezeptionen hier geleitet zu werden. Untergang der Hinterstränge führt bei Mensch und Tier (auch Affen sind oft

untersucht worden, zuletzt von Rothmann) zu Ataxie der Bewegungen und Schlaffheit der Muskeln auf der erkrankten Seite.

Head und Rivers (Brain, Bd. 34) haben die in den Hintersträngen aufwärts geleiteten Empfindungen an Menschen am genauesten untersucht. Sie finden, daß mit Unterbrechung dieser Stränge total verloren wird: Die Fähigkeit der Raumorientierung, die Fähigkeit, die Lage der Glieder zu erkennen, Gestalt, Gewicht, Konsistenz der Körper zu erkennen, auch die Entfernung zweier gefühlter Punkte zu schätzen (Zirkelversuch), ebenso feine Erschütterungen, wie sie etwa vibrierende Stimmgabeln geben, wahrzunehmen. Alle diese Bahnen für die Raum- und statischen Empfindungen bleiben von den Hintersträngen an bis hinauf in den Thalamus, ja von da bis in die Hirnrinde beieinander.

Wird ein Mensch, wie es vorkommt, von einem Stiche oder einer Kugel getroffen, die eine Rückenmarkhälfte durchtrennt, so wird er auf der verletzten Seite zwar lahm, aber seine Tastempfindungsfähigkeit bleibt erhalten, ja sie ist etwas gesteigert. Nur für das Lagegefühl hat er aus den oben erörterten Gründen Störungen. Aber auf der gekreuzten Seite verliert er die Fähigkeit, Tast-, Schmerz- und Temperatureindrücke wahrzunehmen. Ein Teil der sensiblen Leitung muß also bald nach dem Eintritt der Wurzeln auf die andere Seite hinüber kreuzen. Dieser Befund, der viel Kopfzerbrechen und unzählige Tierversuche gekostet hat, wurde anatomisch von mir 1888 erklärt. Auf Figur 3 sieht man, wie ein Teil der Hinterwurzelfasern nach dem Eintritt in die graue Substanz um zerstreute dort liegende Zellen — beim Kaninchen ist es (Kohnstamm 1911) eine mehr geschlossene Säule — aufsplittert. Aus diesen Zellen entspringt eine neue Faserbahn (siehe Abbildung), welche durch die vordere Kommissur in die Vorder- und Vorderseitenstränge hinüberkreuzt und mit ihnen hirnwärts zieht. Diese sekundäre sensible Bahn muß es sein, welche nach dem Experiment und der Pathologie in den Vorder- und Seitensträngen die Berührungs-, Schmerz- und Temperaturempfindung hinaufleitet bis in das Zwischenhirn. Aus ihrer Kreuzung in der grauen Substanz erklärt sich auch, warum die graue Substanz, wie eine reiche physiologische Literatur zeigt, anscheinend an der Leitung der Empfindungen beteiligt ist. Wird sie durch Erkrankungen (Syringomyelie) zerstört, so geht natürlich ebenfalls die Schmerz- und Temperaturempfindung verloren. Die Tastempfindung bleibt zum guten Teil erhalten, weil sie ja auch durch Fasern der Hinterstränge hirnwärts geleitet wird.

Nach Head und Rivers werden Schmerz-, Wärme- und Kältesensationen nicht von den gleichen aber wohl von dicht von beieinander liegenden Bahnen geleitet. Das ist auch in der Oblongata noch so. Diese Autoren berichten von einem Krankheitsherde dort, der den totalen Verlust der Schmerzempfindung auf der gekreuzten Körperhälfte zur Folge hatte, die Temperaturempfindungen aber intakt ließ.



Fig. 3. Schema der receptorischen Bahn von den Hinterwurzeln bis in den Thalamus. Ein Teil kreuzt im Rückenmarke, der andere in der Oblongata. Von da an bis zum Thalamus ist die receptorische Leitung total gekreuzt.

Wenn die Kreuzung für die Schmerz-, Tast- und Temperaturrezeptionen schon im Rückenmarke in Eintrittshöhe erfolgt, so ist das für den in den Hintersträngen aufwärts ziehenden wesentlich der Muskelsensibilität und einem Teile der Tastempfindungen dienenden Abschnitt anders. Dieser endet zunächst in den Hinterstrangkernen der Oblongata (Edinger 1884), und aus diesen entspringt dann eine kreuzende Bahn, die sich an dem frontalen Oblongataende mit der aus den Hinterstrangskernen kommenden vereint, so daß dann hier alle sensiblen Fasern total gekreuzt sind. Einseitige Verletzungen der Oblongata oder der Brücke erzeugen deshalb halbseitigen gekreuzten

Gefühlsverlust. Solche werden nicht selten beim Menschen beobachtet, wenn ein bestimmtes Gefäß erkrankend sich verschließt.

Alle Rezeptionen erreichen also schließlich das Zwischenhirn der gekreuzten Seite.

Aus den Hinterstrangkernen geht eine Verbindung zum Kleinhirne, deren physiologische Bedeutung vielleicht dadurch gegeben ist, daß eben hier die Rezeptionen aus den Muskeln enden. Reizung dieser Kerne (Sherrington) erzeugt gleichseitige Bewegungen.

8b) Einfluß der Oblongata und des Cerebellums. Der statotonische Reflexbogen. Von einer Reihe großer Zellen, die in der Oblongata und hinauf bis in die Mittelhirnbasis liegen, geht ein mächtiger Einfluß auf den Muskeltonus aus. Die Bahnen, die ihn erregen, liegen in der Peripherie der Seitenstränge, die, welche ihn herableiten, in den Vordersträngen und in den Seitensträngen.

Von den sensiblen Wurzeln spaltet sich im Rückenmarke ein Teil ab, der nach Unterbrechung in den Clarkeschen Säulen der grauen Substanz dicht am peripheren Rande des Markes hinauf zum Kleinhirne zieht. Dieser Tractus spino-cerebellaris stellt den zuführenden Reflexbogen zur Kleinhirnrinde dar, dessen abführende Schenkel aus den Kleinhirnkernen stammend, im wesentlichen dem Tonus und der Zusammenordnung der Gliederbewegung mit den Rumpfbewegungen dient. Durchschneidungsversuche des zuführenden Bündels von Marburg und von Bing ergaben, daß die betreffenden Hunde in ihrer Muskelspannung und in der Zusammenordnung der Bewegungen auf der Seite der Durchschneidung schwer geschädigt wurden, ganz wie wenn man das Kleinhirn selbst entfernt hatte. Einseitige Durchschneidung wird nach einiger Zeit ausgeglichen, Tiere mit doppelseitiger Durchschneidung stehen breitbeinig da, wagen kaum sich in Gang zu setzen und spreizen dabei ungeschickt die Hinterbeine. Das Becken steht ganz abnorm tief geneigt, die Vorderbeine sind entweder gespreizt oder so zusammengezogen, daß die Pfoten sich berühren. Das Tier ist außerordentlich ungeschickt im Gehen und ängstlich; bei jedem Schritt überkreuzen sich die Hinterpfoten, das Tier taumelt, wenn es geradeaus schreiten will. Es fällt bald nach rechts, bald nach links, wird bald mit dem vorderen, bald mit dem hinteren Rumpfabschnitt aus der geradlinigen Bahn herausgeworfen. Mit verbundenen Augen wagt es überhaupt nicht zu gehen. Dabei ist der Muskeltonus überall stark herabgesetzt. Alle diese Erscheinungen bessern sich schließlich auch, offenbar, weil noch andere Bahnen für die Aufrechterhaltung des Tonus und der Zusammenordnung bestehen. Auch bei Tauben erzeugt die Durchschneidung der spinocerebellaren Bahn — Biach und Bauer 1909 — die schwersten Gleichgewichtsstörungen. Auch sie werden allmählich, wohl unter dem Einfluß der Augen, ausgeglichen. In

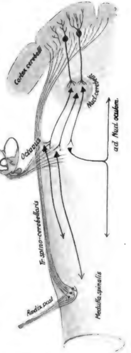


Fig. 4. Schema der Rückenmark-Kleinhirnbeziehungen. Der stato-tonische Reflexbogen.

den Tractus spino-cerebellaris werden also Rezeptionen kleinhirnwärts geleitet, welche wichtig sind für den Muskeltonus und die Zusammenordnung der Bewegungen am Becken und Schultergürtel.

Die ausführenden Bahnen liegen in den Vordersträngen. Bei Betrachtung des Kleinhirnes (siehe den Artikel „Gehirn" und unten S. 512) wird gezeigt, wie aus diesem zahlreiche Faserzüge, deren Erregung heftigste Muskelkrämpfe erzeugt, zu mächtigen Einzelzellen der Oblongata gelangen, die alle ihre Achsenzylinder in die Vorderstränge des Markes senden. Eine

besonders große Gruppe solcher vom Kleinhirn beeinflußter Zellen, der Deiterssche Kern, sendet besonders viele Fasern in das Mark, deren Komplex als Tractus vestibulospinalis bekannt ist. Da um die gleichen Zellen zahllose Fasern aus den Vestibulariswurzeln aufzweigen, so werden durch diese Gruppe auch Rezeptionen, die vom Labyrinth her stammen, auf die Körpermuskelspannung von Einfluß.

Der Deiterskern sendet noch eine weitere Gruppe von Fasern aus, die sich bald in einen frontal gerichteten Ast und einen caudalwärts ziehenden teilen. Der erstere geht bei allen Tieren bis zu den Augenmuskelkernen, der andere bei den Säugern bis in die Kerngegend der den Kopf haltenden Muskulatur, bei den Fischen mit besonders dicken Bahnen bis in den muskulösen Schwanzteil. Dieser Apparat scheint der Optostatik zu dienen, der Zusammenordnung der Spannungen von Augen- und und Körpermuskulatur, wie sie bei jeder Lagenänderung im Raume immer neu nötig wird. Dieses System ist bei den großen Schwimmern und bei manchen Vögeln sehr entwickelt, bei den Säugern und dem Menschen relativ klein. Experimente, die leicht anzustellen wären, sind noch nicht gemacht.

Durchschneidet man einem Hunde die Vorderstränge und unterbricht dadurch den efferenten Strom aus dem Kleinhirne, so werden alle Bewegungen ganz unsicher, weil der gesamte Muskeltonus sofort enorm sinkt. Das Tier kann jetzt nicht mehr klettern, springen, ja läuft meist unsicher und breitbeinig einher.

Wir sehen so, daß aus dem vestibularen Abschnitte des Octavus den Muskelapparaten Erregungen zufließen. Aber auch aus dem cochlearen Abschnitte gelangen Einflüsse in das Rückenmark. Yerkes hat gezeigt, daß eine durch mechanischen Reiz veranlaßte Zuckung des Froschbeines viel kräftiger ausfällt, wenn ihr eine Tonrezeption dicht vorausgegangen ist.

Andere Beziehungen der Oblongata zum Rückenmarke sind bisher nicht bekannt, obgleich die Anatomie vielfach darauf hinweist, daß solche vorhanden sind (Oliven und anderes).

8c) Einfluß des Mittelhirnes. Seitenstränge. Hier hat leider das Experiment noch nicht Gebrauch von der anatomischen Erkenntnis gemacht, daß das Mittelhirndach total andere Apparate mit dem Rückenmarke verbindet als die Basis. Fast alle Versuche unterscheiden hier nicht. Offenbar gehen aber sehr mächtige Einflüsse von dem Mittelhirne aus. Hier liegt in der Basis ein Kern, der Nucleus ruber, der ziemlich ebenso zur motorischen Bahn und zum Kleinhirne geordnet ist wie der Tonusapparat. Die Fasern, welche er in das Rückenmark sendet, reichen bis an den Caudalteil und liegen bei den Säugern etwa in der Mitte der Seitenstränge. Sie heißen Tractus rubro-spinalis und dienen wohl dem Statotonus. Ihr Vorhandensein erklärt vielleicht die Beobachtung von Verworn, nach der enthirnte Grasfrösche, Tiere, welche bei bestimmtem Zufassen sofort in einen Krampf verfallen, dies nicht mehr tun, wenn das Mittelhirn abgetrennt ist. Rothmann hat an Hunden und Affen den Tractus rubro-spinalis durchschnitten. Er sah bei den ersteren vorübergehende, bei den letzteren dauernde Lähmung der operierten Seite auftreten.

Der hemmende Einfluß des Mittelhirnes auf gewisse vorgebildete Bewegungen schwankt, und dies ist, wie Steinach nachwies, auf eine chemische Beziehung zurückzuführen. Oben wurde erwähnt, daß ein geköpfter Frosch im Frühjahre jedes Weibchen, ja oft jeden Gegenstand, den man ihm zwischen die Arme gibt, krampfhaft umklammert und daß diese Umklammerung auch nicht aufhört, wenn man alle Hirnteile wegschneidet. Steinach wies nun nach, daß man auch in den Nichtfrühjahrsmonaten dies Umklammern bei jedem Frosche erzeugen kann, wenn man nur die Verbindungen des Markes mit dem Mittelhirne abtrennt. Es muß also den größten Teil des Jahres hindurch jener Reflex vom Mittelhirne her gehemmt werden. Weitere Untersuchungen des gleichen Autors zeigten dann, daß diese Hemmung aufgehoben wird, wenn Geschlechtsdrüsenprodukte im Blute zu kreisen beginnen und daß bei Kastraten dieser Reflex überhaupt nur angedeutet ist. Er tritt aber sofort ein, wenn man Hodensekret unter die Haut spritzt. In der Brunstzeit muß eine besondere Substanz, die aus den Hoden stammt, die vom Mittelhirne ausgehende Hemmung aufheben. Diese Substanz muß sich dann im Nervensysteme ansammeln, denn dann wirkt eine Injektion mit zerriebenem Nervensystem bei Kastraten ganz wie der Saft der Hoden selbst.

In das Mittelhirndach mündet der Sehnerv. Wenn ein plötzlicher Eindruck auf ein Froschauge fällt, wird das ganze Tier für einen Moment erregbarer, die Zuckungen seiner Beine, die man etwa durch Berühren erzeugt, fallen viel intensiver aus (Merzbacher).

8d) Einfluß des Neencephalon auf das Rückenmark. Pyramidenbahn. Nur bei den Säugern geht aus dem Großhirne eine ununterbrochene Bahn bis in das Rückenmark. Sie liegt bald in den Hintersträngen (Känguru, Maus u. a.), bald (bei dem

Menschen, dem Hunde, dem Kaninchen) in den Seitensträngen. Der größte Teil dieses Tractus cortico-spinalis — Pyramidenbahn — ist zum Ursprunge gekreuzt. Schon der Umstand, daß diese Bahn bei allen anderen Vertebraten fehlt, zeigt, daß sie nicht, wie man oft annahm, zum Zustandekommen der Bewegungen notwendig ist. Auch die Erfahrung, daß ihre Unterbrechung bei Kaninchen, ja noch bei Hunden von nur vorübergehenden Ungeschicklichkeiten gefolgt ist, daß sie erst bei Affen zwar ernste aber immer noch ausgleichbare Bewegungsstörungen veranlaßt (Rothmann), und daß sie erst beim Menschen mit totaler Gebrauchsunfähigkeit beantwortet wird, all das weist darauf hin, daß wir hier nicht ein essentiell motorisches Bündel vor uns haben. Gerade aus der menschlichen Pathologie besitzen wir viele Erfahrungen über Ausfall dieses dort dicken Seitenstrangbündels. Es sind isolierte Erkrankungen bekannt, die von seinem Ursprung in der keit, immer unentbehrlicher für die Art wird.

B. Das verlängerte Mark — Medulla oblongata.

Am oberen Ende des Rückenmarkes nehmen, weil am Kopfe wenig Muskeln zu versorgen sind, die für die Körpermuskulatur bestimmten Apparate an Größe sehr ab, es bleiben nur noch die für den Schluckakt, das Saugen, die Augenstellung und das Kauen notwendigen übrig, dagegen vermehren sich sehr die Nervenkerne für den visceralen Apparat. Von hier gehen die starken Bahnen aus, welche via Vagus die Eingeweide mit Hemmungsfasern versehen, hier münden, auch hauptsächlich auf dem Vaguswege, die Nerven ein, welche dem Zentralorgan von den Eingeweiden Rezeptionen zutragen, und hier liegen die rezeptorischen und effektorischen wohl zusammengeordneten Apparate, welche die Atmung ermöglichen.

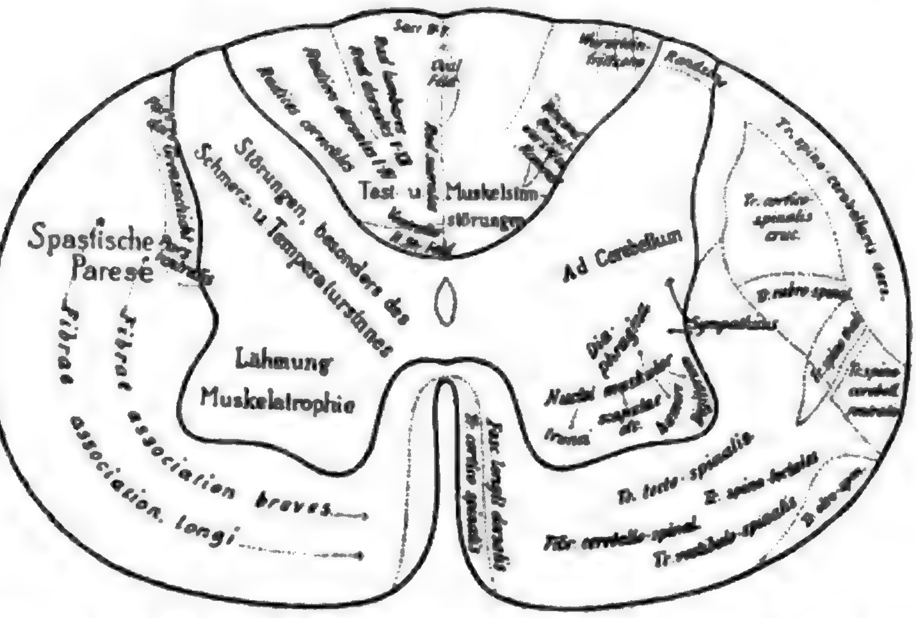


Fig. 5. Uebersicht über die Teile des Rückenmarkquerschnittes. In der linken Hälfte sind die Störungen eingezeichnet, welche bei Untergang des betreffenden Teiles auftreten.

Rinde besonders der vorderen Zentralwindung bis zur Endigung im Rückenmarke verlaufen. Dann können auf der betroffenen Seite freiwillig keine Bewegungen mehr ausgeführt werden, die Reflexerregbarkeit ist meist erhalten. Außerdem gerät die gelähmte Seite in Kontraktur. Diese Störungen treten selbst dann ein, wenn die Pyramidenbahn intakt aber im Gehirne von Verbindungen mit der übrigen Rinde abgetrennt ist (Spielmeyer, Hoestermann). Einstweilen wird man die Pyramide für den Weg halten dürfen, auf welchem die Tätigkeit des Eigenapparates des Neencephalon, der Rinde, auf das Rückenmark übertragen wird, ein Weg, der mit Zunahme der Rinde an Wichtigkeit, immer unentbehrlicher für die Art wird.

In diesen Teil des Nervensystems münden aber auch vom Labyrinth her statische Rezeptionen, und es dringen vom Kleinhirn zahlreiche Bahnen hier ein. Die zusammenordnenden Bahnen, welche im Rückenmark nur einen relativ geringen Raum beanspruchten, werden nun sehr stark, weil von hier ja Bewegungen erregt werden, die außerordentlich feinen Zusammenspiels bedürfen. Dies ist der Eigenapparat des verlängerten Markes; unter ihm hinweg und in ihm ziehen natürlich die Bahnen dahin, welche das Rückenmark selbst mit weiter vorn liegenden Hirnteilen verbinden.

Der Eigenapparat der Oblongata ist ebenso selbständig wie der des Rückenmarkes.

Man hat wiederholt Früchte untersucht, welche gar kein Groß- und Mittelhirn besaßen und an ihnen gesehen, daß die gleichen Rezeptionen, welche an normalen Kindern Saugen, Atmen, Schlucken, Regulierung der Augenstellung erregen, es auch hier tun. Eine anencephale Frucht bewegt die Glieder, schreit und saugt ebenso kräftig an dem Finger, den man in ihren Mund steckt, wie ein normales Kind. Ein enthirnter Frosch, der noch die Oblongata besitzt, sitzt zwar ebenso still wie ein Rückenmarksfrosch, aber er hat seine Muskelspannung noch besser und er orientiert sich auf den Rücken gelegt oder ins Wasser geworfen viel sicherer und schneller.

Wegnahme der Oblongata vernichtet natürlich sofort die Atmung, der Blutdruck sinkt und viele vasomotorische Reflexe werden unmöglich. Ebenso hört alles Mundbewegen und Lautgeben sofort auf und im Bereiche des intestinalen und Herzvagus treten die schwersten Störungen, wie sie im wesentlichen einem Aufhören von Bewegungshemmungen entsprechen, auf.

Die meisten der in der Oblongata entstehenden Funktionen werden an anderer Stelle dieses Werkes genauer besprochen. Deshalb soll hier nur kurz auf das hingewiesen werden, was wir über das Arbeiten der zentralen Apparate wissen. An diesem für die wichtigsten Lebensfunktionen, den Herzschlag und die Atmung mitbestimmenden Gehirnteile ist natürlich dem Tierversuch eine schnell erreichte Grenze gesetzt und bei der außerordentlich engen Nachbarschaft, in welcher hier die mannigfachsten Apparate und Bahnen liegen, siehe Figur 6, ist auch jeder experimentelle Eingriff ein relativ zu grober. Mehr als auf anderem Gebiete muß deshalb hier das Ergebnis der Pathologie des Menschen herangezogen werden. Hier besitzen wir reiche Erfahrungen über den Ausfall der einzelnen Teile, wie er oft genug durch Erkrankungen dieser selbst oder durch kleinere Gebiete treffende Gefäßverschlüsse geschaffen wird.

1. Schlucken, Lautbildung, Kauen, Antlitzbewegung. Beiderseits von der Medianebene liegt im Caudalabschnitt dicht unter dem Boden der Rautengrube der Kernapparat des Hypoglossusnerven. An seine Intaktheit ist die Fähigkeit der Zunge zur Sprechbewegung (vgl. den Artikel „Stimme und Sprache") und zum Schlucken (vgl. den Artikel „Verdauung") gebunden. Man kennt partielle Erkrankungen, bei denen nur die Lippen- oder Zungenbewegungen ausfallen, und schwersten Untergang aller Kernzellen, wo dann die Sprechfähigkeit und das Schlucken total aufgehoben sind. Sehr oft beteiligen sich hier auch die analogen Kerne, welche via Facialisbahn die Gaumenmuskeln versorgen. Dann wird die Sprache näselnd und genommene Flüssigkeiten lassen sich nicht von der Nase abschließen.

Ventral vom Schluckmuskelkerne und etwas lateraler liegt beiderseits bis in das obere Rückenmark hinabreichend eine Kerngruppe, welche die Fasern des Nervus accessorius aussendet. Wird sie zerstört, so erlischt die Fähigkeit der Stimmbandbewegung. Frontal von ihr setzt sich die motorische Kernsäule fort, um zu einem langgestreckten sehr kräftigen Kerne, demjenigen des Antlitznervens, anzuschwellen, der die Gesichtsmuskeln alle innerviert. Es sind nicht nur Atrophien durch Krankheit, sondern auch angeborenes Fehlen dieses Kernes bekannt und daher weiß man, daß mit seinem Untergang die Fähigkeit zur Bewegung des gleichseitigen Gesichtes total erlischt. Und Analoges ist klinisch beobachtet an der mitten in der Brücke liegenden analogen Kerngruppe, welche den Masseter und die Pterygoidei innerviert; mit ihrem Untergang erlischt die Fähigkeit, den Kiefer zum Kauen zu benutzen. Totale Kaulähmung zentralen Ursprunges ist allerdings noch nicht gesehen worden, Kaumuskelschwäche oder oft schon. Alle diese Kerne finden wir auch bei Tieren von den Fischen an. Man darf wohl annehmen — Experimente stehen noch aus —, daß sie da den gleichen Funktionen dienen.

Die Ursprungskerne des Nervus hypoglossus die des Nervus facialis und des Kaumuskelnervens aus dem motorischen Trigeminus sind durch zahlreiche Collateralen mit den Kernen für die sensible Innervation des Kopfes (Trigeminus) verknüpft. Es wird wohl das Schlucken, das Kauen, die Lautbildung, auch das Saugen der Kinder auf diesen Zusammenordnungen beruhen. Mit Ausnahme des Kauens erfolgten die betreffenden Bewegungen alle zwangsmäßig, wenn die entsprechenden sensiblen Reize zugeführt werden, und sie werden unmöglich, wenn das verhindert wird. Ein Bissen im Schlund löst kräftige Schluckbewegungen aus, er bleibt aber ruhig liegen, ja er kann nicht einmal freiwillig geschluckt werden, wenn man vorher die Rachenschleimhaut mit Kokain unempfindlich gemacht hat (Exner). Für die einzelnen Teile des Nervus hypoglossus, die je auf verschiedene Muskeln wirken, ist auch gewiß, daß sie durch ein außerordentlich feines Netzwerk miteinander zu gemeinsamer Tätigkeit verbunden sind, wie denn in der Tat beim Schluckakt, der ein gutes Beispiel für einen sukzessiv auf verschiedene Muskeln wirkenden Reflex bietet, die Zusammenordnung und die Sicherung der Sukzession außerordentlich wichtig sein muß. Bekanntlich hat das Großhirn auf alle diese Kerne bei den Säugern einen Einfluß gewonnen. Wir kennen auch die sich

von den Pyramiden abspaltenden Bahnen, die jenen vermitteln, aber es zeigt noch das Verhalten großhirnloser Früchte (Sternberg u. a.) beim Saugen und Schlucken und der Schrei, den die während der Geburt trepanierte menschliche Frucht ausstößt, wenn die Oblongata berührt wird, auch für die Lautgebung den reflektorischen Ursprung.

2. Atemzentrum. Was die Lehrbücher der Physiologie Atemzentrum der Oblongata nennen, löst die Anatomie heute in einen gut durchgearbeiteten Apparat auf.

Die Gesamtinnervation der Atmung ist an anderer Stelle besprochen (siehe den Artikel „Atmung"), aber da ihr wichtigster Apparat in der Oblongata liegt, muß dessen doch kurz gedacht werden. Die Atmung ist am besten bei den Säugern studiert, doch besitzen wir auch über diejenige der Fische, Amphibien und Reptilien viele Arbeiten. Die Kiemendeckelbewegung der ersteren ist reflektorisch erregt (Baglioni, Kuiper), wobei die Erregbarkeit der Zentren durch den Sauerstoffmangel reguliert wird. Es handelt sich immer um einen rhythmisch auftretenden Reflex mit sehr deutlicher refraktärer Phase im Inspirium, der bei den Säugern einmal angeregt derartig kettenförmig abläuft, daß zunächst die Nasenflügel sich bewegen, dann die Stimmritze sich erweitert und dann schließlich die Interkostalmuskeln und das Zwerchfell zur Kontraktion kommen. Der Reflexbogen erhält Rezeptionen aus der Lunge durch die Fasern des Nervus vagus. Jedenfalls erzeugt Reizung dieses Nerven Inspirationen. Die Lungenvagusfasern enden zunächst ganz wie es oben von den anderen sensiblen Nerven gezeigt ist, in einem Ganglion, hier dem Ganglion jugulare (Möllgart) und von da erst gehen Vaguswurzeln in den am Boden der Rautengrube gelegenen Vaguskern. Es besteht noch keine absolute Einigkeit darüber, ob der Respirationskern nur vom Vagus her erregt werden kann oder ob nicht Veränderungen des Kohlensäuregehaltes des Blutes zu seiner Erregung schon ausreichen (siehe den Artikel „Atmung").

Dicht ventral vom Vaguskerne liegen zahlreiche Züge, welche von Kohnstamm bis in die Nähe des Zwerchfellnervenkernes im oberen Halsmarke verfolgt worden sind. Diese Fasern müssen die Uebertragung auf den motorischen Abschnitt des Atemreflexbogens leisten. Ihre Unterbrechung, die Gad und Marinesco durch heiße aufgelegte Glasperlen bewirkten, unterbricht den Ablauf der Atmung. Im Halsmark liegen die Kerne der Zwerchfellnerven, im Brustmark diejenigen für die Interkostalnerven. Hohe Abtrennung des Rückenmarkes läßt diese Kerne noch für eine Zeitlang in rhythmischer Tätigkeit, es bleiben „spinale Atembewegungen" (Langendorf, Mosso). Aber man kann diese „automatische Tätigkeit" nur sehen, wenn man sofort nach der Operation zunächst eine Zeitlang künstliche Atmung macht.

Dieser Apparat, welcher so wichtig für die Erhaltung einer lebenswichtigen Funktion ist, ist offenbar so angelegt, daß er doppelseitig wirkt. Das zeigt der Portersche Versuch: Schneidet man das obere Halsmark durch, so kann der Atemreflex via Phrenicuskern nicht mehr normal ablaufen, das gleichseitige Zwerchfall wird gelähmt. Wenn man aber nach einiger Zeit den andersseitigen Zwerchfellnerv selbst durchschneidet, so beginnt es wieder mit den Atembewegungen, weil offenbar die Impulse auf die erhalten gebliebene Seite herabziehend jetzt tiefer unten zu dem bisher reizlos gebliebenen Zwerchfellkern sich wenden. Er arbeitet auch noch eine Zeitlang fort, wenn ihm die Rezeption von der Lunge her genommen wird.

3. Vasomotorenzentrum. Ludwig und seine Schüler fanden, daß Abtrennung der Oblongata vom Rückenmarke Sinken des arteriellen Blutdrucks erzeuge, ebenso, daß derselbe bei Reizung des Halsmarkes steige. Man nahm deshalb allgemein hier ein vasomotorisches Zentrum an. Der Apparat, der in Betracht kommt, kann aber nichts anderes sein, als der frontalste Abschnitt der effektorischen Sympathikuskernreihe (siehe Fig. 1). Wir wissen, daß der motorische Abschnitt des visceralen Systems, der im Rückenmark nur als kleine Kerngruppe in den Seitenhörnern sichtbar war, in der Oblongata, medial vom rezeptorischen Vaguskern, zu einem großen Kern anschwillt, und daß aus diesem zahlreiche Fasern stammen, die mit dem Vagus und dem Sympathikus den Zentralapparat verlassen. Dieser experimentell noch nicht genügend durchforschte Apparat wäre wohl geeignet, den Gefäßtonus und auch die Herzbewegung zu beeinflussen. In der Tat sind auch von den einzelnen Abschnitten des Rückenmarkes aus Störungen der Gefäßspannung zu erreichen, und Goltz hat zuerst gezeigt, wie Zerstörung des Rückenmarkes eine gänzliche Lähmung der Blutgefäße hervorruft. Die zuführenden Bahnen sind nicht näher bekannt, aber wir wissen, daß sowohl die Bulbär- wie die Spinalzentren der Gefäßnerven durch Erstickung, aber auch durch Reizung der Körperoberfläche erregt werden. Auch vom Labyrinth her kommen vielleicht erregende Rezeptionen. Wenigstens sah Chamis nach Ausrottung desselben bei Hunden den Blutdruck auf der operierten Seite sinken. Näheres siehe in den Artikeln „Kreislauf des Blutes" und „Sympathisches Nervensystem".

4. Herztätigkeit. Von dem erwähnten motorischen Vaguskern geht auch auf die

Herztätigkeit ein mächtiger Einfluß aus, sie wird reguliert und verlangsamt. Werden die Vagi durchschnitten, so schlägt das Herz schneller; auch hier hat man meist an automatische Tätigkeit der Zentren gedacht. Bernstein aber hat zuerst nachgewiesen, daß zuführende Bahnen den Kern erregen müssen, daß es sich um einen rhythmischen Reflex handelt. Sie müssen im Halsmark liegen, denn wenn er dieses durchschnitt, erzeugte Trennung der Vagi nicht mehr den oben erwähnten Erfolg. Ganz gewiß ist dieses Herzzentrum aber von der Peripherie her zu beeinflussen, und es ist sehr wahrscheinlich, daß sympathische Bahnen eben der zuleitende Schenkel sind. Das Herz stand still, als Goltz die Baucheingeweide des Frosches oder eines Säugers stark klopfte, ebenso verlangsamt sich der Herzschlag, wenn man eine Darmschlinge kräftig drückt oder das zentrale Ende des durchschnittenen Nervus splanchnicus reizt. Auch durch Reizung der Nasenschleimhaut, durch Vermehrung des inneren Schädeldruckes und vieles andere, kann man Herzverlangsamung erzeugen. Näheres siehe im Artikel „Kreislauf des Blutes".

5. Speichelabsonderung. Auch andere Anteile des visceralen Nervensystemes liegen in der Oblongata. So finden sich da große Zellen, die bei Ausrottung der Speicheldrüsennerven atrophieren und die man wohl als den Ausgangspunkt für die bei der Speichelabsonderung (siehe den Artikel „Speichel") wirksamen efferenten visceralen Nerven ansehen darf. Die mannigfachen Rezeptionen, auf welche hin Speichelsekretion eintritt, verlaufen alle in der Trigeminusbahn und diese ist jenen Zellen dicht benachbart, wohl durch Fibrillen mit ihnen verbunden.

Auch die Verbindungen des Rückenmarkssympathikus mit dessen im Hypothalamus gelegenen Ursprungszentren durchziehen die Oblongata. Deshalb kann man von da aus allerlei Sympathikusreizungen oder Lähmungen erzeugen (siehe Fig. 6).

6. Gesamtspannung der Muskeln. Die Gesamtspannung der Muskeln wird wahrscheinlich von einem wesentlich in der Oblongata liegenden Apparat aufrecht erhalten, der aus sehr großen Zellen besteht, die ihre Fasern hinab ins Rückenmark und auch hirnwärts schicken (Nucleus motorius tegmenti). Eine Reizung desselben im Bereich der Oblongata erzeugt schwere tonische Krämpfe der gleichseitigen Muskulatur, (Notnagel, Binswanger, Ziehen). Man nimmt deshalb allgemein, aber offenbar fälschlich, ein „Krampfzentrum" in der Oblongata an. Um diese Zellen verzweigen sich Bahnen, die aus den Kleinhirnkernen kommen. Horsley hat nachgewiesen, daß durch Erregung dieser Kleinhirnkerne tonische Krämpfe entstehen, ganz wie sie auftreten, wenn man den Apparat selbst in der Oblongata reizt (s. Schema Fig. 4).

Wir kennen auch die rezeptorischen Fasern zu diesem effektorischen Teil des Tonusreflexbogens. Ein großer Teil wird von den hinteren Wurzeln zugeleitet, endet zunächst in der Clarkeschen Säule des Rückenmarkes und zieht von da zur Kleinhirnrinde. Aus der Kleinhirnrinde gehen dann Bahnen in die Kleinhirnkerne und von da zu dem erwähnten Apparate in der Oblongata. Ein anderer Teil der Rezeption wird vom Labyrinth zugeleitet. Mit Entfernung der Labyrinthe sinkt (R. Ewald) der Muskeltonus im ganzen Körper. Die Vestibularisfasern enden in einem Kerne der seitlichdorsalen Oblongata. Auf dem Wege dahin splittern viele Collaterale aus ihnen auf um eine besonders starke Anschwellung des motorischen Haubenkernes, den Deiterskern, und zu dieser kommen ebenfalls wieder Fasern aus den Kleinhirnkernen. Die Fasern aus dieser letzteren großen Abteilung des motorischen Kerns sind in ihrem weiteren Verlauf auch sehr gut bekannt. Man weiß, daß sie gekreuzt und ungekreuzt im dorsalen Längsbündel der Oblongata dahinziehen und daß sich ihre Enden im Okulomotorius- und Abducenskern an die Ursprungszellen dieses Nerven anlegen. Dieser Kernteil dient, wie die vergleichende Anatomie und die Klinik gleichmäßig zeigen, dem Tonus und der Zusammenordnung der Augenmuskeln mit denjenigen der Kopf- und Nackenmuskulatur. Aus einer etwas kaudaler liegenden Gruppe von Zellen des Deitersschen Kerns gehen aber zahlreiche Bündel weit hinab in das Rückenmark. Reizungen dieser ganzen Gegend veranlassen krampfhafte Drehungen des Kopfes und Rotation der Augen in der gleichen Richtung.

Dieser Gesamtapparat dient der Fähigkeit festzustehen und auszuschreiten, der Statotonik und es ist schon bei Besprechung der Beziehungen des Kleinhirnes zum Rückenmarke seiner gedacht worden. Er fehlt keinem Wirbeltiere, steht aber da, wo das Kleinhirn fehlt oder minimal ist, unter dem Einfluß des Labyrinthes allein, so bei manchen Fischen und einigen Amphibien. Ein Teil von ihm, dessen S. 508 gedacht ist, muß der Optostatik dienen.

7. Zuckerausscheidung im Harn bei Verletzung der Oblongata. Bisher ganz unverstanden steht die Tatsache da, daß, wie Claude Bernard zeigte und wie seitdem unzählige Male bestätigt worden ist, durch einen Einstich in die Medianlinie, etwa in der Höhe des kaudalen Abschnittes der Akustikuskerne eine mehrere Stunden dauernde Zuckerausscheidung im Urine hervorgerufen werden kann. Nicht einmal der Ort, von dem aus

dieser Zuckerstich regelmäßig gelingt, ist bisher genau anatomisch festgestellt, man weiß gar nicht, welche Fasern zerstört werden müssen.

8. Funktion der Oliven. Viele Teile der Oblongata sind physiologisch noch gar nicht untersucht. So vor allem die unteren Oliven. Weiß man über ihre Funktion auch noch gar nichts, so bietet der Umstand vielleicht einen Fingerzeig, daß sie sich erst bei den Säugern kräftig entwickeln und daß sie bei den ganz oder teilweise aufrecht gehenden, den Affen und den Menschen, erst ihre höchste Ausbildung erreichen, auch daß sie bei den im Wasser lebenden Säugern andersartige und geringere Entwickelung erfahren als bei den Landtieren. Vielleicht haben sie mit der Statik zu tun.

9. Die Oblongatafunktion nach den Erfahrungen der Pathologie. Die Oblongata wird bei den Säugern an ihrer ventralen Seite von den Bahnen aus dem Großhirne zum Rückenmarke begleitet, aus denen Fasern abspaltend zu den Kernen der Schluck-, Kaumuskel- und Antlitznervengehen, deren Verbindung mit dem Großhirne herstellend. Deshalb können Verletzungen auch Symptome von seiten dieser Bahnen erzeugen (siehe Fig. 6). Das gleiche gilt für die bei allen Vertebraten vorhandenen Gefühlsbahnen zum Thalamus und für die ebenfalls immer anwesenden Bahnen des Rückenmarkes zum Kleinhirne im lateralen Oblongataabschnitte. Alle diese Züge sind zwar nicht durch das Tierexperiment, wohl aber in Beobachtungen an erkrankten Menschen auf ihre Funktion geprüft. Die Klinik ist deshalb imstande, für die meisten auf einem Schnitte durch das verlängerte Mark sichtbaren Teile anzugeben, welche Funktion ausfällt, wenn sie untergehen. Was man bis jetzt weiß, zeigt die folgende Figur, die vielfach auf eine klinische Arbeit von Wallenberg zurückgeht.

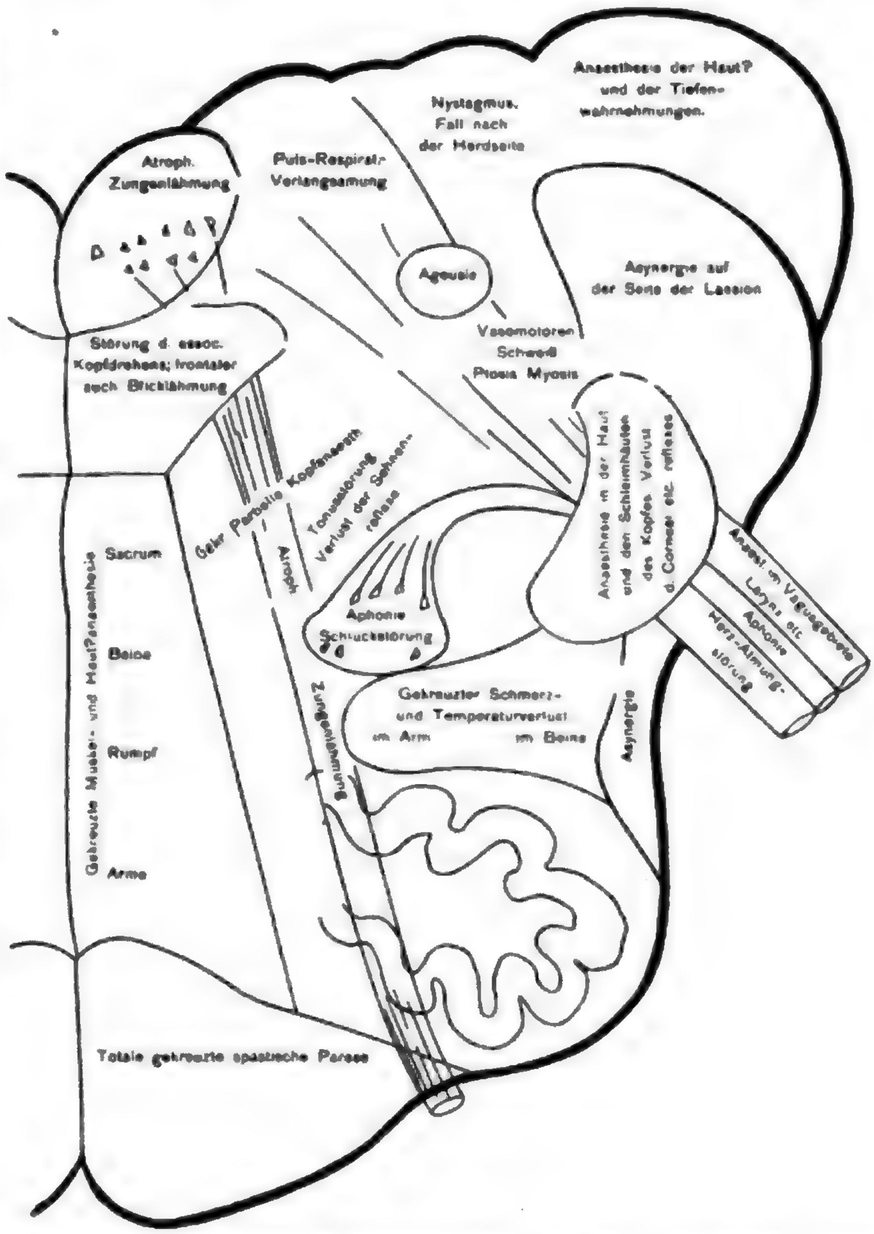


Fig. 6. Die rechte Hälfte eines Schnittes durch die menschliche Oblongata. Es sind die Störungen eingeschrieben, welche nach Erkrankung der einzelnen Teile beobachtet sind.

Literatur. *Die gesamte ältere Literatur bei* **Eckhard**, *Physiologie des Rückenmarks in Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd. 2, Tl. 2.* — *Die neuere Literatur besonders bei* **O. Langendorff** *in Nagels Handbuch der Physiologie, Bd. 4, Braunschweig 1905.* — **C. S. Sherrington**, *in Schäfers Handbook of Physiology, London 1909.* — *Späteres bis 1912: im Physiologischen Centralblatt oder in den Folia neurobiologica.* — *Vgl. außerdem besonders* **Sherrington**, *The integrative action of the nervous system, London 1908.*

L. Edinger.

Rudberg
Frederik.

Geboren am 30. August 1800 in Norrköping, gestorben am 14. Juni 1839 in Upsala. Von 1824 bis 1827 studierte er im Ausland, vorzugsweise in Paris und Berlin, wurde 1827 Mitglied der Stockholmer Akademie und 1828 ordentlicher Professor für Physik in Upsala. 1837 bestimmte er den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Gase.

E. Drude.

Rudolphi
Karl Asmund.

Geboren am 14. Juni 1771 in Stockholm, gestorben am 29. November 1832 in Berlin. Er studierte von 1790 an Medizin in Greifswald und promovierte dort auf Grund zweier Dissertationen über die Eingeweidewürmer zum Doktor der Philosophie und der Medizin. Er wurde 1797 außerordentlicher Professor in Greifswald und machte 1801 bis 1803 im Auftrage der schwedischen Regierung eine Reise über den größten Teil des Kontinents, um Erfahrungen über Tierarzneikunde zu sammeln. Als Frucht dieser Reise erschienen seine „Bemerkungen über Naturgeschichte, Medizin und Tierarzneikunde usw." (2 Bde., Berlin 1804, 1805). Im Jahre 1808 wurde er ordentlicher Professor der Medizin in Greifswald und bekam zwei Jahre später einen Ruf als Professor der Anatomie nach Berlin, wo er ein anatomisches und zootomisches Museum begründete. In den Anfang des 19. Jahrhunderts fallen seine wichtigsten Arbeiten über die Helminthen und die Anatomie der Pflanzen, sowie anatomisch-physiologische Abhandlungen, in denen er mehrere neue zootomische Tatsachen mitteilte. Später hat er sich ausschließlich mit der Anatomie der Wirbeltiere beschäftigt. Er war einer der erfolgreichsten Lehrer der Zoologie der damaligen Zeit. Zu seinen Schülern zählte auch Johannes Müller, bei dem durch Rudolphi die Liebe zur Anatomie geweckt wurde.

Seine Hauptwerke sind: „Entozoorum sive vermium intestinalium historia naturalis" (2 vol., Amsterdam, 1808 bis 1810, cum XII tabulis), die er später im Auszug als „Entozoorum synopsis" (Berlin 1819) erscheinen ließ, ferner sein unvollendet gebliebener „Grundriß der Physiologie" (3 Bde., Berlin 1823 bis 1828) und die „Bemerkungen aus dem Gebiete der Naturgeschichte, Medizin und Tierheilkunde auf einer Reise durch einen Teil von Deutschland, Holland und Frankreich gesammelt" (Berlin 1804 bis 1805). Ein vollständiges Verzeichnis seiner Schriften findet man im Medizinischen Schriftstellerlexikon von Callisen (Bd. XXXII, p. 28 bis 32).

Literatur. *Carus, Geschichte der Zoologie. München 1872. — Burckhardt, Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907. — Ferner Waldeyer im biographischen Lexikon hervorragender Aerzte usw., Bd. V, S. 112.*

W. Harms.

Ruheperioden.

1. Definitionen. 2. Periodizität im allgemeinen. 3. Ruheknospen. 4. Johannistriebe. 5. Tropische Bäume. 6. Jahresperiode. 7. Ursachen der Ruhe. 8. Die Phasen der Ruheperiode. 9. Kambium, Wurzel, Samen. 10. Frühtreiben. 11. Winterschlaf und ähnliche Erscheinungen im Tierreich.

1. Definitionen. Unter Ruheperioden im weitesten Sinne des Wortes versteht die Biologie zeitweilige Stillstände in der Lebenstätigkeit, wobei der Stillstand die Gesamtheit aller Lebensäußerungen oder nur gewisse augenfällige physiologische Funktionen betreffen kann. So spricht man von „ruhenden Samenkörnern" z. B. bei reifem Getreide, in welchem — wenn scharf getrocknet — alle Lebenstätigkeit, praktisch gesprochen, sistiert ist. Bei unseren Bäumen und Sträuchern aber finden wir, mitten in ihrer Sommertätigkeit, die kürzlich ausgestalteten „Winterknospen" schon in Ruhe, insofern das Wachstum in diesen Knospen still steht; hier betrifft die Ruheperiode wesentlich nur diese eine Funktion — und zwar rein lokal, indem z. B. die Wurzeln gleichzeitig weiter wachsen können. Auch im Tierreiche hat man zeitweilige Stillstände entsprechender Natur; die Tardigraden u. a. niedere Tiere werden durch gelegentliches Eintrocknen ganz untätig; und z. B. im Puppenleben der Schmetterlinge und anderer Insekten sind verschiedene Funktionen oft lange Zeit sistiert.

Die Ruheperioden in diesem weitesten, vagen Sinne umfassen nun aber sehr verschiedene Erscheinungen; teils solche, die ganz unmittelbare Folgen von zeitweiligen „ungünstigen" Zuständen in der umgebenden Natur (im Milieu) sind, teils aber solche, deren Relation zu periodischen Zuständen im Milieu weniger augenfällig oder gar zweifelhaft ist; ja man spricht von unabhängigen „autogenen" Ruheperioden als Gegensatz zu den durch äußere Umstände direkt hervorgerufenen „aitiogenen" Untätigkeitszuständen.

Als Beispiele dieser direkt vom Milieu bedingten, so zu sagen dem Organismus „aufgezwungenen" Untätigkeit sei der totale Stillstand der Lebensäußerungen in trockenen Samen, Sporen, Bakterien und dergleichen erwähnt; ferner der Stillstand, welcher durch niedrige Temperatur bedingt wird bei allen Organismen, die nicht durch so große Kälte getötet werden (auf einer solchen erzwungenen Untätigkeit der Mikroorganismen beruht die Konservierung der Nahrungsmittel durch Kälte bezw. Austrocknung). Sobald aber das Milieu wieder für die Lebenserscheinungen günstig wird, hört der Stillstand auf: der Same keimt, das Bakterium fängt wieder seine Gärtätigkeit an usw.

Etwas ganz anderes ist die Ruheperiode im engeren Sinne, die wir wohl am deutlichsten bei Pflanzen sehen, und die vorzugsweise das Wachstum betrifft — und zwar ganz normal auf ziemlich bestimmten Entwickelungsstadien, für verschiedene Species und Organe verschieden. Es sind bald ganze Sproßanlagen, wie z. B. in den „Winterknospen", bei vielen Zwiebeln und Rhizomen, die in Ruheperiode liegen; bald aber sind es nur wenig differentiierte Knospenanlagen, wie z. B. die „Augen" der Kartoffeln. Die meisten Samen sind nicht gleich nach ihrer Entwickelung keimfähig; d. h. selbst bei den günstigsten Keimungsbedingungen liegen sie oft lange Zeit passiv und sind äußerlich nur durch ihr Nichtfaulen von toten Samen zu erkennen. Dabei sehen wir auch hier große Unterschiede in bezug auf das Entwickelungsstadium des solcherart ruhenden Keimes: die meisten Samen haben einen weit differentiierten Embryo, z. B. die Bucheln, während andere einen ganz kleinen Embryo führen, wie z. B. Eranthis. Und bei Pilzen findet man Ruheperioden durch Sklerotien, große Zygosporen sowie durch staubfeine Sporen, z. B. Wintersporen der Rostpilze, repräsentiert.

Es sind diese eigentlichen Ruheperioden, die hier näher behandelt werden sollen. Sie unterscheiden sich von den „aufgezwungenen Untätigkeitszuständen" unter anderem sofort dadurch, daß in den in bezug auf Wachstum ruhenden Pflanzen bezw. Organen ein deutlicher Stoffwechsel vor sich geht (z. B. Atmung). Zum Verständnis der Verhältnisse in der Natur muß daran erinnert werden, daß während der Ruheperiode auch eine gänzliche Untätigkeit eintreten kann, wenn z. B. große Kälte herrscht, oder wenn Wasser fehlt, wie bei trocken aufbewahrten Samen. Bei vielen Frühlingssträuchern aber, z. B. Weiden, ist die Ruheperiode der Winterknospen oft schon gänzlich überstanden zu einer Zeit, wenn die Kälte das Wachstum noch hindert; hier liegt also erzwungene Untätigkeit vor — nicht eigentliche Ruhe. Ebenso bei Samen, die aus der Ruheperiode getreten sind, aber wegen Wassermangel oder Kälte nicht keimen können.

2. Periodizität im allgemeinen. Schon diese Andeutungen genügen, um einzusehen, daß die eigentlichen Ruheperioden nicht direkt von ungünstigen äußeren Zuständen hervorgerufen werden, sondern daß sie jedenfalls durch den ganzen Entwickelungsgang der betreffenden Species mitbestimmt sind. Nun muß allerdings daran festgehalten werden, daß jede Lebensäußerung als Reaktion der durch die Organisation gegebenen „inneren Konstitution" mit den verschiedenen wechselnden Faktoren des „äußeren Milieus" aufzufassen ist. Und im Laufe der individuellen Entwickelung (der Ontogenese) können durch die Einwirkungen des Milieus allerlei Beeinflussungen der „persönlichen Beschaffenheit" des gegebenen Individuums erfolgen, derart daß die Dispositionen zu bestimmten Reaktionen begünstigt oder gerade gehemmt werden. Sehr oft findet sich bei Pflanzen in ganz jugendlichen Stadien eine „sensible Periode", während welcher eine Beeinflussung z. B. durch Kälte, reiche oder sparsame Nahrungszufuhr u. a. m. bestimmend für viele spätere Reaktionen sein kann. So wird angegeben, daß Kälte während der Keimung von Rübensamen die Neigung zum frühzeitigen Schossen sehr stark erhöht, also gegen das Eintreten einer Ruheperiode der betreffenden Organe wirkt; in solchen Fällen spürt man offenbar einen, wenn auch sehr indirekten Zusammenhang zwischen Milieu und Ruhe.

Das wesentliche der Sache, die Periodizität im Entwickelungsgang, wird dabei aber kaum tangiert: die schossende Rübe fängt wie die nichtschossende ihr Leben an: Keimung, Blattrosettenbildung und Stoffspeicherung in der Wurzel — dann erst kommt das „abnorme" frühzeitige Schossen; die gewöhnliche lange Ruhe ist ausgeschaltet oder wohl eigentlich nur verkürzt. Die Periodizität bleibt.

Ein Bakterium unter günstigen, ganz konstant gehaltenen Lebensbedingungen wird sich bald teilen; die Tochterzellen wachsen heran und teilen sich ihrerseits — und so geht es fort. Die Teilung ist offenbar eine Folge von Wachstum und Ernährung, d. h. von den dadurch hervorgerufenen Aenderungen der Zustände der Zelle. Und diese ganze Periodizität im Lebenslauf ist also nicht von einer Periodizität äußerer Faktoren abhängig. Ganz ebenso ist es mit dem Lebenslauf höherer Organismen: z. B. bei einer der ephemeren hapaxanthischen Pflanzen, welche im Laufe eines Sommers mehrere Generationen hervorbringen können (Poa annua, Stellaria media u. a. m.), werden die Phasen des Lebenslaufes: Keimung, vegetative Entwickelung, Blüte, Samenbildung und darauf wieder Keimung usw., ebenfalls Ausdrücke periodischer Veränderungen in den Dispositionen der Pflanze selbst sein — nicht aber Folgen von äußerer Periodizität. Und so ist es überall; die Phasen des Lebenslaufs sind bei allen Organismen wesentlich durch die Organisation gegeben, ebenso wie beim Menschen, wo embryonales Leben, Kindheit, Jünglingszeit usw. Ausdrücke eines von Aenderungen im Milieu nicht bestimmten Entwickelungsgangs sind. Daß ein Entwickelungsgang sich schneller oder langsamer abspielen kann, je nach den Zuständen im Milieu, ist eine ganz andere Sache.

Aber selbstverständlich zeigt sich die Periodizität nur, wenn ein Lebenslauf überhaupt ermöglicht wird; und durch verschiedene Konstellationen äußerer Faktoren können gewisse Phasen oder Erscheinungen, z. B. Blühen oder Fruktifikation ganz gehindert werden. Auch kann, z. B. augenfällig bei vielen niederen Pilzen und Algen, eine gegebene Species je nach dem Milieu in verschiedener Weise sich gestalten, einen verschieden verlaufenden periodischen Entwickelungsgang zeigen (z. B. diese oder jene Art von Wuchsform oder von Reproduktionsorganen) u. dgl. m. Insofern ist die Periodizität — wie alle Lebensäußerungen — vom Milieu mitbedingt. Und wir könnten uns wohl eine anders konstruierte Welt denken, in welcher das Bakterium in irgendeinem Milieu aperiodisch etwa zu einem großen Zylinder anwachsen müßte — in unserer Welt ist nun einmal dafür gesorgt, daß die Bäume nicht in den Himmel wachsen. Und es liegt wohl außerhalb unserer Interessensphäre zu fragen, inwieweit es die „ideale Baumnatur an sich“ ist, welche die Grenzen setzt, oder ob es nur die Mängel der „bösen Welt“ sind.

So ist es auch mit der Periodizität: sie ist eine der charakteristischen Reaktionen der gegebenen Organismenkonstitutionen mit den vorliegenden Milieuverhältnissen. Und wie wir auch mit diesen Verhältnissen operiert haben, die Periodizität der Lebensphänomene haben wir nicht umgehen können. Das wesentlichste der hier näher zu betrachtenden eigentlichen Ruheperioden ist denn auch die Periodizität, die mehr oder weniger starke Schwankung in der Wachstumstätigkeit. Ob aber das Wachstum während der Ruhe absolut still steht oder nur mehr oder weniger stark gehemmt bezw. reguliert ist, wird Nebensache bleiben, und wird vielfach von rein äußeren Verhältnissen abhängen können.

3. Ruheknospen. Wohl am auffälligsten sind die Ruheperioden der Winterknospen unserer Bäume und Sträucher, indem hier das Ruhephänomen am reinsten hervortritt. Die Knospen werden bekanntlich sehr frühzeitig in den Blattachseln angelegt; schon während der Laubentfaltung im Frühling sind sie in Bildung begriffen, und bald werden sie größer und größer, bis sie gegen Ende des Sommers fast ihre volle Größe erreichen. Es ist eine noch immer recht allgemeine Auffassung, daß „der Eintritt in den Ruhezustand in unserer Zone durch den Laubabfall gekennzeichnet ist“, aber diese Auffassung ist irrig. Es ist keine solche Beziehung zwischen Laubfall und Knospenruhe; diese tritt lange vor dem Laubfall ein, und überdies haben unsere immergrünen Bäume ganz gleiche Ruhephänomene wie die laubwerfenden Bäume. Die Ruhe der Knospen steht ebensowenig im Abhängigkeitsverhältnis zur „Reife“ des Holzes, etwa derart, daß vorgeschrittene Holzreife bedingen sollte, daß die Knospen leichter zum Treiben kommen (vgl. Abschnitt 8).

Die Winterknospen befinden sich, näher betrachtet, schon gleich bei ihrer Anlage in einem Ruhezustande, insofern die in ihnen sich differentiierenden Stengel- und Blattorgane im Wachstum stark gehemmt sind, während sich die jungen Knospen zu den mit Knospenschuppen bekleideten gedrungenen Gebilden — eben den fertigen Winterknospen — entwickeln. Ganz anders bei Knospen, die nicht ruhen, wie z. B. die Knospen der wachsenden Kräuter und Sträucher, die aus den Blattachseln ganz ohne Bildung von Knospenschuppen direkt hervorschießen. Solche unmittelbar zu „Bereicherungstrieben“ sich entwickelnden Knospen finden sich auch sehr allgemein bei Bäumen und Sträuchern und sind gerade hier instruktiv. Besonders augenfällig sind sie bei Alnus incana, bei vielen Salix- und Acerspecies u. a. m.; und sie sind also dadurch charakterisiert, daß sie an den noch an der Spitze weiterwachsenden jungen belaubten Sprossen ohne vorausgegangene Ruhe sofort austreiben („sylleptische“ Triebe nach Späth) und somit „bereichernde“ Verzweigung hervorrufen. Diese Triebe gehören zum normalen Jahrestriebsystem des Baumes, finden sich aber häufig und regelmäßig nur an jüngeren Pflanzen. An ihnen bilden sich in den Blattachseln die gewöhnlichen Ruheknospen.

4. Johannistriebe. Die sylleptischen Triebe dürfen nicht mit Johannistrieben verwechselt werden. Diese bei Fagus und Quercus vorkommenden Ausschläge eines augenfälligen, oft abweichend gefärbten „zweiten Treibens“ sind Manifestationen einer eigentümlichen selbständigen Periodizität. Die beiden genannten Species gehören zu denen, die relativ schnell im Frühling das Austreiben abschließen, indem die Sprosse bald Terminalknospen bilden. Bei Fagus erfolgt (in Deutschland und Skandinavien) der Johannistrieb etwa 3 bis 4 Wochen, bei Quercus etwa 4 bis 6 Wochen nach Abschluß des ersten Treibens, des eigentlichen Frühlingstreibens. Der Johannistrieb ist bei den zwei genannten Species eine auch an alten Bäumen ganz regelmäßige Erscheinung, die ganz ohne nachweisbare äußere Gründe erfolgt. Es ist meistens nur die Endknospe der betreffenden Frühlingstriebe, welche im Johannistrieb aktiv wird; und bei weitem nicht alle diese Knospen treiben. Dabei aber entspricht der Johannistrieb in seinem Wachstum durchaus dem ersten Trieb; er ist eine ebenso normale Erscheinung. Wie auch der Sommercharakter

variieren mag, stets zeigen sich die Johannistriebe bei Buche und Eiche. Und selbst ins Warmhaus gebracht geben diese Pflanzen nicht die fragliche Periodizität auf; nur können in solchen Fällen sogar mehrere Male johannistriebartige Austreibungen hervorgerufen werden. Die bis jetzt ausgeführten Versuche, die kurze Ruheperiode vor dem Johannistrieb zu umgehen, sind gescheitert.

Dieser eigentümlichen, scharf markierten Doppelperiode der Knospen bei Eiche und Buche entspricht das recht häufige Vorkommen von „verkappten Johannistrieben" bei vielen von unseren Bäumen und Sträuchern, z. B. Acer, Fraxinus, Prunus, Syringa u. a. Damit hat man die namentlich bei jüngeren Exemplaren häufige Erscheinung bezeichnet, daß während der Austreibungsperiode ein zeitweiliges Abnehmen der Wachstumstätigkeit in den Stengelinternodien eintritt, indem gleichzeitig kleinere Blätter auftreten und eine Terminalknospe sich zu bilden anfängt — darauf aber fängt das Wachstum wieder kräftiger an, größere Blätter und längere Internodien werden gebildet, bis dann schließlich definitives Abnehmen und Abschluß des Wachsens mit Bildung der Terminalknospe erfolgt. In diesem Verhalten treffen wir eine „autogene" Periodizität ähnlicher Art wie bei der Bildung von Johannistrieben.

5. Tropische Bäume. Die beiden soeben genannten Phänomene haben — besonders wenn man das erwähnte Verhalten der Buche und Eiche im Warmhaus auch mit in Betracht zieht — große prinzipielle Uebereinstimmung mit dem Verhalten vieler Bäume der feuchtwarmen tropischen Klimate. Hier hat man trotz angenäherter Gleichmäßigkeit im Klima — und jedenfalls ganz ohne regelmäßige Beziehungen zu dem sich immerhin zeigenden schwächeren periodischen Wechsel der Beleuchtung, Temperatur, Feuchtigkeit usw. — oft eine sehr ausgesprochene Periodizität in bezug auf Laubbildung, indem mehr- bis oftmals im Jahre ein neuer „Blattschub" (Volkens) sich entwickelt, d. h. ein abgeschlossener beblätterter Trieb hervorgebracht wird. Mit Laubfallsperioden haben diese periodisch entstehenden Blattschübe keine direkte kausale Verbindung, und so ist es für die Frage der Ruheperiode auch hier ganz irrelevant, ob diese Bäume periodisch ganz, bezw. an einem Teil der Zweige, oder niemals unbelaubt sind. Ueberhaupt ist der Laubfall in weit höherem Grade von äußeren Einflüssen abhängig als die periodischen Schwankungen des Treibens.

6. Jahresperiode. Wo nun, wie bei uns — oder überhaupt in Klimaten mit einer ausgeprägten Jahresperiode (Winter- oder Trockenzeit) — ein totaler Laubfall vor Eintritt der „ungünstigen" Jahreszeit erfolgt und die Dauerknospen vorher schon in Ruhe sind, erhält man bei nur oberflächlicher Einsicht zu leicht den Eindruck, daß die Ruhe gewissermaßen als Folge einer Anpassung an das Klima zu betrachten sei. Nach dem hier mitgeteilten, sowie auch nach der mehr und mehr ablehnenden Stellung der experimentellen Vererbungsforschung zu der früher ohne weiteres angenommenen sogenannten Akklimatation durch „erbliche Anpassungen" kann dahingegen geltend gemacht werden, daß nur solche Organismen an den betreffenden Lokalitäten Stand halten können, deren gegebene „innere Konstitution" eine sich der periodischen Ungunst fügende (oder sie kompensierende) physiologische Periodizität ermöglicht.

Es ist dabei augenfällig, wie höchst verschieden diese Periodizität sich zeigt; wir haben ja — um gar nicht von Therophyten zu reden — bei sehr vielen perennen Repräsentanten unserer Flora eine Sommerruhe z. B. bei sehr vielen Frühlingsstauden und Zwiebelpflanzen. Die hier sozusagen antizipierte Bildung ruhender Knospen mit ihren beigegebenen Speichergeweben bezw. Organen ist ein augenfälliges Beispiel selbstständig regulierter Periodizität — ganz gleichgültig, ob ein Treiben leichter oder schwieriger hervorgerufen werden kann, ob die Ruhe absolut ist oder nur durch langsames Wachstum repräsentiert ist.

7. Ursachen der Ruhe. Wie Periodizität oder Rhythmik in den Lebenserscheinungen entstand, läßt sich nicht beantworten. Als unmittelbare Ursachen des periodisch abnehmenden Wachstums hat man an Stoffwechselzustände gedacht. Mangel an Zucker oder an löslichen Stickstoffverbindungen sowie an Enzymen, oder gar Untätigkeit von anwesenden Enzymen, wurde von den betreffenden Forschern für das Sistieren des Wachsens verantwortlich gemacht; und einige heutige Autoren halten noch an derartigen Auffassungen fest. Darauf gerichtete spezielle Arbeiten, besonders mit Zwiebeln, Knollen und Samen, haben aber zur Evidenz die Unrichtigkeit solcher Ideen gezeigt; insofern weder in bezug auf lösliche Nahrungsstoffe noch auf Enzyme irgendein charakteristischer Unterschied der ruhenden oder nichtruhenden Organe gefunden ist. Und z. B. der Einfluß anästhetischer Mittel (Aether, Chloroform), welcher nur im Anfang und am Ende der Ruhe ein Treiben ermöglicht, ruft während der ganzen Ruheperiode ein gleich gerichtetes Löslichmachen gespeicherter Stoffe hervor. Indem nun bekanntlich während des Treibens bezw. der Keimung eine intensive Lösung dieser Stoffe vor sich geht, muß man annehmen, daß das lebhafte Wachstum den Stoffwechselverlauf

beeinflußt oder gar bestimmt, nicht aber umgekehrt. Im Verhältnis zu den fraglichen gröber charakterisierten Stoffwechselvorgängen sind die Wachstumsschwankungen ganz unzweifelhaft das primäre. Von den Stoffwechselhypothesen zur Erklärung der periodischen Schwankung des Wachstums muß demgemäß abgesehen werden. Die Bildung von Ruheknospen führt zur Speicherung der Assimilate, die bei fortgesetztem Wachsen hätten verwendet werden können. Und ist, wie wohl möglich, die Einleitung des herbstlichen Falls der Blätter eine Folge der wegen Stoffspeicherung in den Geweben aufhörenden Assimilationstätigkeit, so würde dieses wiederum bedeuten, daß die Bildung der Ruheknospen als primäre Erscheinung den späteren Laubfall ganz wesentlich mitbedinge. Man hat in bezug auf Ruhe und Stoffwechsel früher gewissermaßen die Kausalität invers aufgefaßt. Wachstum und Stoffwechsel verlaufen wohl auch vielfach nur parallel ohne notwendige kausale Interferenz.

8. Die Phasen der Ruheperiode. Die ruhende Knospe hat während ihrer Entwickelung zuerst abnehmende Austreibungsfähigkeit, darauf kommt die tiefste, kürzer oder länger dauernde Ruhe, und dann wieder zunehmende Austreibungsfähigkeit. Dies kann sehr leicht durch Experimente gezeigt werden. So hat Entlaubung eines Baumes oder Strauches, z. B. eines Flieders oder einer Buche, bald nach der normalen Laubentfaltung die Wirkung, daß die jungen Ruheknospen austreiben, neues Laub erzeugend. Später im Sommer erfolgt dieses Treiben weniger ergiebig und geschieht nicht mehr, wenn die Knospen schon recht groß sind (der Baum bleibt alsdann ohne Laub bis zum Frühling). Die Knospen können jedoch zum Treiben gebracht werden, wenn sie ätherisiert werden. Noch später — während der tiefsten Ruhe — können aber auch Aetherisierung und andere Mittel nicht mehr das Treiben hervorrufen. Allmählich aber wirkt Aetherisierung wieder besser und besser, bis zuletzt ein Treiben ohne solche künstliche Beeinflussung leicht vonstatten geht — die Ruheperiode ist verklungen; nur durch etwaige Kälte im Winter mag eine gezwungene Untätigkeit bedingt sein. Diese erst durch Aetherisieren recht erkannten, schärfer begrenzten Phasen der Ruheperiode werden als Vorruhe (abnehmende Treibfähigkeit), Mittelruhe (fehlende Treibfähigkeit) und Nachruhe (zunehmende Treibfähigkeit) bezeichnet. Die erste und letzte dieser Phasen scheinen überall der Ruheperiode eigentümlich zu sein, die Mittelruhe kann einerseits sehr kurz oder vielleicht kaum völlig realisiert sein (z. B. Kätzchenknospen gewisser Weiden, und wahrscheinlich auch die wenig entwickelten, oft „schlafend" genannten Knospen der proximalen Teile der Triebe unserer Holzpflanzen), andererseits aber sehr lange dauern (z. B. Laubknospen der Buche). Uebrigens zeigen selbst äquivalente Knospen desselben Baumes eine oft nicht geringe Variabilität in bezug auf die Zeit des Ausklingens der Ruhe, besonders deutlich in den Tropen. Die Phasen der Ruhe werden wahrscheinlich durch das Zusammenspiel von zwei antagonistischen Faktoren oder Tendenzen reguliert oder mitbedingt, nämlich einerseits Wachstumsaktivierung (Aktion) und andererseits Hemmung (Inhibition). In der Vor- und Nachruhe sollte demnach wesentlich nur die Hemmung das Wachstum hindern, während in der Mittelruhe die Aktivierung selbst sistiert wäre. Die das Treiben hervorrufende Wirkung des Aetherisierens u. dgl. in der Vor- und Mittelruhe wäre demnach besonders auf Lähmung der Hemmung zurückzuführen; und die Unwirksamkeit solcher Behandlung in der Mittelruhe wäre auch verständlich.

9. Kambium, Wurzeln, Samen. Die Ruheperioden sind lokale Erscheinungen derart, daß die verschiedenen beim Wachstum beteiligten Organe einer Pflanze zu recht verschiedener Zeit ihre Ruhe haben. So ist das Kambium unserer Bäume am Dickenwachstum intensiv tätig während die Knospen in Ruhe sind. Andererseits existiert doch auch eine Korrelation der Teile am Baum; so scheint das Kambium während seiner Ruhe im Spätherbst oder Winter die vorhandene Treibfähigkeit der kleinen „schlafenden" Knospen herabzustimmen. Totale Ruhe besitzt wohl das Kambium nicht; obwohl das eigentliche Dickenwachstum während der Kambialruhe bis jetzt nicht hat hervorgerufen werden können, so reagiert doch das Kambium stets auf Verwundung, indem „Kallus"-Gewebe gebildet wird. In der betreffenden Reaktionsfähigkeit manifestiert sich dabei aber eine schöne Periodizität: Für eine Reihe deutscher Bäume kann die wechselnde Geschwindigkeit der Kallusbildung durch folgende mittlere relative Zahlen ausgedrückt werden: März 6, Mai 8, Juli 10, Oktober 7, Dezember 5.

Die Ruheperiode der Wurzeln ist schwierig rein zu studieren. Unsere Bäume haben wohl meistens zwei Hauptwachstumsperioden, etwa im Frühling und im Herbst. Ob eine absolute Ruhe überhaupt vorkommt, ist nicht ganz sicher; Korrelationen mit dem Sproßsystem spielen wohl hier eine Rolle.

Die Ruheperioden der Samen zeigen oft deutlich alle drei Phasen, z. B. Calendula, Sinapis u. a., bei welchen die grünreif gepflückten Samen viel schneller keimen als die gelbreifen, die oft hartnäckig ruhen, während wieder die ganz reifen Samen sehr

schnell keimen. Sehr viele Samen sind aber, auch wenn völlig reif und trocken, in fester Ruhe, wie viele Unkrautsamen. Und während z. B. bei Getreide die kurze Ruhe der reifen Körner meistens durch scharfes Trocknen (Malzgerste) oder Aetherisieren aufgehoben wird, führt Eintrocknen gewisse andere Sämereien gleichsam tiefer in die Ruhe ein, z. B. Fraxinus, Agrostemma u. a. Und dabei ist es wichtig zu bemerken, daß unter den Samen einer und derselben Mutterpflanze oft sehr große Variabilität in bezug auf Ruheerscheinungen vorkommt.

10. Frühtreiben. Die Ruhe, besonders der Blütenknospen bei Zierhölzern, Zwiebeln, Knollen und Rhizomen setzt der praktischen Blumentreiberei fühlbare Grenzen. Und es scheint, daß die enger begrenzte Mittelruhe, wo sie überhaupt vorkommt, nicht zu überwinden ist. Daß vorübergehendes Abkühlen (z. B. Frost im Spätherbst) oder Erwärmen, teilweises Eintrocknen u. dgl. besonders die Nachruhe verkürzen bezw. aufheben kann, ist eine alte, längst in der Praxis verwertete Erfahrung. Im letzten Dezennium sind stärker wirkende Mittel mit Erfolg eingeführt, so namentlich Aetherisierung bezw. Chloroformierung, etwa durch 24 bis 48 Studen, und Warmbadbehandlung, d. h. Eintauchen der zu treibenden Zweige in etwa 30° C warmes Wasser durch 3 bis 12 Stunden vor dem Einsetzen ins Treibhaus. Auch andere Mittel, z. B. Injektion von Wasser oder verdünntem Alkohol u. dgl. in die Knospen, oder Verwundung, z. B. Entfernung vom Knospenschuppen u. a. m., sind vorgeschlagen worden. Aetherisierung sowie Warmbad, welches letztere wahrscheinlich meistens die Aetherisierung verdrängen wird, wirken jedenfalls in der Vor- und Nachruhe sehr energisch bei vielen Sträuchern, und haben die Praxis stark beeinflußt.

11. Winterschlaf und ähnliche Erscheinungen im Tierreiche. Winterschlaf und ähnliche Erscheinungen haben wohl kaum nähere Beziehungen zu den Ruheperioden der Pfanzen. Der Winterschlaf mit seinem eigentümlichen herabgesetzten Stoffwechsel ist offenbar eine aitiogene Erscheinung komplizierter Natur. Durch Kohlenoxydvergiftung und andere Einflüsse können z. B. bei Mäusen ähnliche Erscheinungen beliebig hervorgerufen werden. Das Puppenleben der Insekten bietet in seinem letzten Stadium aber Aehnlichkeiten mit der Ruheperiode dar; in gewissen Fällen kann denn auch durch Aetherisierung eine Beschleunigung des Entfaltens des Insektes erfolgen. Am meisten der Ruheperiode der Pflanzen entsprechend ist wohl die zeitweilige Untätigkeit befruchteter Eier, z. B. beim Reh u. dgl. — Daß im Tierreich die Periodizität, die Rhythmik der Lebenserscheinungen äußerst verbreitet ist, sei hier nur beiläufig bemerkt: die Pulsationen der Vakuolen vieler Protozoen bis zum Herzschlag des Menschen zeigen dies — und das Zusammenwirken antagonistischer Faktoren spielt bekanntlich in der Tierphysiologie eine große Rolle.

Literatur. **Burgerstein,** *Fortschritte in der Technik des Treibens der Pflanzen. Progressus Rei Botanicae, Bd.* **4**, *1911.* — **Christensen,** *Kemiske Undersøgelser over Løg i Hvileperioden. Oversigt over D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Forhandlinger 1908.* — **Jesenko,** *Einige neue Verfahren die Ruheperiode abzukürzen. (Ber. d. D. Bot. Gesellsch., Bd.* **24**, *1911.)* — **Johannsen,** *Studier over Planternes periodiske Livsyttringer. D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter, 6 R, Bd. 8, Heft 5, 1897.* — **Derselbe,** *Das Aetherverfahren beim Frühtreiben, 2. erweiterte Auflage, Jena 1906.* — **Derselbe,** *Ueber Rausch und Betäubung der Pflanzen. Naturwissenschaftliche Wochenschrift, N. F., Bd.* **2**, *1903.* — **Klebs,** *Ueber die Rhythmik in der Entwickelung der Pflanzen. Sitzber. d. Heidelberger Akad. d. Wiss., 1911. In dieser Arbeit finden sich etwas andere Auffassungen als die hier vertretenen.* — **Molisch,** *Das Warmbad als Mittel zum Treiben der Pflanzen. Jena 1909.* — **Müller-Thurgau und Schneider-Orelli,** *Beiträge zur Kenntnis der Lebensvorgänge in ruhenden Pflanzenteilen. Flora, N. F., Bd.* **1**, *1910.* — **Simon,** *Untersuchungen über das Verhalten einiger Wachstumsfunktionen usw. Jahrbuch für wissenschaftliche Botanik, Bd.* **43**, *1906.* — **Späth,** *Der Johannistrieb. Berlin 1912.* — **Volkens,** *Laubfall und Lauberneuerung in den Tropen. Berlin 1912.*

In diesen, meist neueren, Schriften findet man zahlreiche weitere Hinweise auf ältere Arbeiten von Askenasy, Fischer, Jost, Müller-Thurgau u. a.

W. Johannsen.

Ruinenmarmor.

Konkretionäre kalkige Bildungen im Mergel der Umgegend von Florenz, die infolge ihrer eigentümlichen Verteilung färbender Mangan- und Eisenerze gleichsam das verkleinerte Bild von Ruinen bieten. Sie sind in ihrer Entstehung vergleichbar den Lößpuppen und Imatrasteinen.

Rumford

Sir Benjamin Thompson, Graf von.

Geboren am 26. März 1753 in Woburn, Massachusetts, gestorben am 14. August 1814 in Auteuil bei Paris. Er war zunächst Lehrer in Bradford und Rumford, trat beim Ausbruch des Freiheitskrieges in die Miliz und kämpfte auf englischer Seite, zog 1783 nach England, trat 1785 in Dienste Karl Theodors von Pfalzbayern, der ihm den Grafentitel erteilte. Hier wirkte er eifrig für die Reorganisation der Armee. 1799 kehrte er nach

England zurück und widmete sich Untersuchungen über die Wärmetheorie. Durch Beobachtungen beim Bohren von Kanonen wurde er als einer der ersten dazu geführt, die Wärme als eine Form von Arbeit zu erkennen.

Literatur. *Renwick, Life of Count R., Boston 1845.* — *Bauernfeind, B. T. Graf von R., München 1889.*

E. Drude.

Rumpfgebirge.

Abgetragene alte Faltengebirge (vgl. den Artikel „Gebirge").

Rundhöcker.

Berge, Hügel, die in einem Gletscherbett lagen und durch das Eis abgeschliffen und gerundet wurden (vgl. den Artikel „Eis").

Runge

Friedlieb Ferdinand.

Geboren am 8. Februar 1795 zu Billwärder bei Hamburg, gestorben am 25. März 1867 in Oranienburg, nachdem er eine Zeitlang Professor Extraordinarius für Technologie in Breslau, dann im Dienste der Preußischen Seehandlung tätig gewesen war. Der Schärfe seiner Beobachtungen und seinem weiten Blick verdankt die Chemie zahlreiche wichtige Ergebnisse: Runge entdeckte und beschrieb sorgfältig das Anilin, das Phenol (Carbolsäure), die er aus dem Steinkohlenteer isolierte. Ferner verdankt man ihm die erste Darstellung des Atropins, des Koffeins und andere phytochemisch wichtige Beobachtungen. Er suchte durch leicht verständliche Werke die Chemie in ihrer Anwendung auf die Technik populär zu machen. Sehr bemerkenswert ist seine „Farbenchemie" und seine Untersuchung des Krappfarbstoffes. Trotz dieser großen Verdienste um einzelne Zweige der Chemie ist Runge nahezu vergessen worden. Erst in neuerer Zeit beginnt man ihn gebührend zu würdigen. Seine Werke und Abhandlungen sind in Poggendorffs biographisch-literarischem Handwörterbuch Bd. 2, S. 721, und Bd. 3, S. 1153, zusammengestellt.

E. von Meyer.

Ruscheln.

Faule Ruscheln heißen im Silbererzdistrikt von St. Andreasberg i. H. Gangspalten, die statt mit Erz mit zermalmtem Nebengestein erfüllt sind. Ursache ist der Gebirgsdruck.

Rutheniumgruppe.[1]

a) Ruthenium. b) Rhodium. c) Palladium.

a) Ruthenium.

Ru. Atomgewicht 101,7.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Formarten und physikalische Konstanten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Spektralchemie. 10. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Das Atomgewicht des Rutheniums ist nach der Tabelle für 1913 zu 101,7 angenommen worden.

2. Vorkommen. Das Ruthenium ist ein ständiger Begleiter des Osmiridiums, in dem es in Mengen bis zu 5% enthalten ist; an Schwefel gebunden findet es sich als Laurit und ist auch ein untergeordneter Begleiter der meisten Platinerze.

3. Geschichte. Das Element wurde 1845 in den Platinrückständen durch Claus entdeckt, der ihm Rußland zu Ehren den Namen Ruthenium gab; in der Folge wurde die Chemie des Rutheniums besonders von Joly, Deville und Debray gefördert.

4. Darstellung und Verwendung. Zur Gewinnung des Metalls wird fein verteiltes Osmiridium in eine Schmelze von NaOH und Na_2O_2 eingetragen. Aus der wässerigen Lösung der hierbei gebildeten Natriumsalze Na_2XO_4 von Säuren des Ir, Os und Ru lassen sich durch Sublimation im Chlorstrom Os und Ru als flüchtige Tetroxyde abscheiden. Beim Erhitzen dieses Sublimates hinterbleibt RuO_4, das in Salzsäure gelöst, mit Magnesium gefällt und im Wasserstoffstrom geglüht, metallisches Ru liefert.

Verwendung hat das Metall trotz vielen wertvollen Eigenschaften seiner Seltenheit wegen bisher nicht gefunden.

5. Formarten und physikalische Konstanten. Ru ist ein Metall von grauer Farbe und großer Härte. Es besitzt kristallinische Struktur und ist daher in der Kälte brüchig. Sein Schmelzpunkt liegt oberhalb 1950°; im elektrischen Ofen oder im Vakuum bei 800° läßt es sich destillieren. Die Dichte schwankt je nach der Vorbehandlung zwischen 12,06 und 12,26; die spezifische Wärme zwischen 0 und 100° ist 0,0611.

Das beim Behandeln von Ru-Zn-Legierungen mit Salzsäure erhaltene fein verteilte Metall ist explosiv aus bisher unbekannten Gründen, doch erscheint im Hinblick auf das analoge, befriedigend erklärte Verhalten z. B. des Rhodiums (s. unten) die Annahme einer Allotropie ausgeschlossen.

[1]) Ueber die allgemeinen Beziehungen dieser Gruppe zur Osmiumgruppe vgl. den Artikel „Osmiumgruppe".

In gleicher Weise wie die anderen Platinmetalle läßt sich das Ruthenium auch als Schwamm oder Mohr gewinnen (s. Platin im Artikel „Osmiumgruppe").

6. Valenz und Elektrochemie. Gemäß den empirischen Formeln seiner Sauerstoffverbindungen (RuO, Ru_2O_3, RuO_2, [H_2RuO_4], [$HRuO_4$], RuO_4) betrachtet man das Ruthenium als zwei-, drei-, vier-, sechs-, sieben- und achtwertig, obwohl über die Molekulargröße dieser Körper nichts Sicheres bekannt ist. Die Oktovalenz im Tetroxyd RuO_4 weist das Ruthenium mit dem Osmium (s. dieses) in die 8. Gruppe des periodischen Systems.

Bezüglich des elektrochemischen Verhaltens sei im allgemeinen auf das beim Platin Gesagte verwiesen. Rutheniumionen sind kaum bekannt und der Metalloidcharakter des Elements findet seinen Ausdruck in der Existenz sehr beständiger Ruthenat- und Perruthenatanionen RuO_4'' und RuO_4'. Auch die Doppelhalogenide vom Typus M_3RuX_6 und M_2RuX_6 führen das Ruthenium im sekundär stark dissoziierten Anion.

7. Analytische Chemie. 7a) Qualitative Analyse. Ruthenium erteilt der Boraxperle eine schwarze Färbung.

Ruthensalze geben folgende nasse Reaktionen:

Schwefelwasserstoff und Schwefelammon fällen braunschwarzes, in $(NH_4)_2S$ schwer lösliches RuS_2.

Alkalihydroxyde geben schwarzes, säurelösliches $Ru(OH)_3$.

Charakteristisch und sehr empfindlich sind die Farbreaktionen mit NH_3 und $Na_2S_2O_3$ (intensiv rotviolett), mit KCNS (rot, in der Hitze violett) und mit KNO_2 (orangegelb, bei Zusatz von wenig $(NH_4)_2S$ dunkelrot).

7b) Quantitative Analyse. Außer der Fällung mit Schwefelammonium und Ueberführung des gebildeten Sulfids in Metall durch Erhitzen wendet man auch die elektrolytische Abscheidung aus phosphorsaurer Dinatriumphosphatlösung an.

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines Verhalten des Metalls. In kompaktem Zustande widersteht das Metall den meisten chemischen Einflüssen und ist selbst von Königswasser und schmelzendem Bisulfat nicht merklich angreifbar. Nur die Hydroxyde, Oxyde, Superoxyde und Nitrate der Alkalien und Erdalkalien wirken unter Bildung von Ruthenaten oberflächlich ein. In den zahlreichen, zum Teil als chemische Verbindungen wohl definierten Legierungen mit unedleren Metallen büßt das Ruthenium viel ein von seiner erstaunlichen Widerstandsfähigkeit, die durch Passivierung in rauchender Salpetersäure noch weiter gesteigert werden kann, und ist dann in Königswasser löslich. Noch reaktionsfähiger ist das feinverteilte Metall, das sich mit Chlor und Schwefel ziemlich leicht verbindet und beim Erhitzen an der Luft bereits partiell in Dioxyd verwandelt, im Sauerstoffstrom sogar teilweise als Tetroxyd verflüchtigt werden kann. Im übrigen ist die Affinität zu Gasen sehr gering, nur mit Kohlenoxyd scheint bei etwa 350° eine Verbindung zu entstehen.

8b) Verbindungen des Rutheniums mit Sauerstoff. Die Existenz des Ruthenium(II)oxyds RuO und des Ruthenium(III)oxyds Ru_2O_3 ist nicht sichergestellt, wenigstens sind sie in reinem Zustande unbekannt.

Ruthenium(III)oxydhydrat, $Ru(OH)_3$, wird als schwarzbrauner, in Alkalien unlöslicher, amorpher Niederschlag aus Ruthen(III)chloridlösungen mittels Kalilauge gefällt.

Ruthenium(IV)oxyd, RuO_2, entsteht beim Glühen von $Ru(SO_4)_2$ in Form metallglänzender grauer Blättchen mit schillernder Oberfläche und ist nur schwierig sublimierbar.

Ruthenium(IV)oxydhydrat, $Ru(OH)_4$, aus $Ru(SO_4)_2$ und Kalilauge, gelbbraun gelatinös.

RuO_3 und Ru_2O_7, die Anhydride der noch nicht isolierten Ruthensäure H_2RuO_4 und Perruthensäure $HRuO_4$, sind unbekannt, doch existieren die Salze dieser Säuren.

Ruthenate entstehen beim Schmelzen fein verteilten Ruthens mit Oxyden, Hydroxyden oder Nitraten der Alkalien und Erdalkalien als dunkelrote, oktaedrisch kristallisierende Verbindungen, deren Färbekraft der des Permanganats nahekommt.

Die grün gefärbten Perruthenate bilden sich bei der Oxydation alkalischer Ruthenatlösungen mit Chlor und kristallisieren mit 1 Mol. H_2O. Ruthenate und Perruthenate lassen sich auch durch Auflösen von RuO_4 in Alkalien darstellen.

Ruthenium(VIII)oxyd, Rutheniumtetroxyd, RuO_4, durch Oxydation von Ruthenaten mit überschüssigem Chlor dargestellt, bildet eine goldgelbe, wasserlösliche Kristallmasse, ist schon bei gewöhnlicher Temperatur mit goldgelbem Dampf flüchtig und kann im Vakuum leicht sublimiert werden. Durch Erhitzen auf 106° oder durch Alkohol wird es unter Feuererscheinung zu RuO_2 reduziert. Es besitzt ozonartigen Geruch und greift im Gegensatz zu OsO_4 Augen und Respirationsorgane nicht an. Fp. 22,5°.

8c) Verbindungen mit Schwefel. Ruthenium(III)sulfid, Ru_2S_3, bildet als Laurit einen Begleiter des Osmiridiums.

Ruthen(IV)sulfid, RuS_2, wird aus Ruthensalzlösungen in der Wärme durch Schwefel-

wasserstoff als schwarzbrauner Niederschlag abgeschieden. In der Kälte entsteht das gelbbraune, leicht zersetzliche Ruthenium(VI)sulfid, RuS_3.

8d) Verbindungen mit Halogenen. Ruthenium(II)chlorid, $RuCl_2$, entsteht aus fein verteiltem Metall im Chlorstrom als schwarzes, kristallinisches, ganz unlösliches Pulver.

Ruthenium(III)chlorid, $RuCl_3$, aus $Ru(OH)_3$ oder RuO_2 oder RuO_4 und Salzsäure, auch aus Ruthenschwamm und Chlor bei Gegenwart von Kohlenoxyd erhältlich, stellt eine pomeranzengelbe zerfließliche, nach dem Trocknen fast schwarze, blätterig kristallinische Masse dar, deren Lösung sich leicht zu einer tiefbraunen Flüssigkeit von intensivem Färbevermögen zersetzt. Durch Zusammenkristallisieren mit den Chloriden der Alkalien erhält man die Doppelsalze vom Typus M_2RuCl_5 und M_3RuCl_6. Beim Digerieren von $RuCl_3$ mit wässerigem Ammoniak bei 40° entsteht ein tiefdunkelrotes Salz $2Ru(OH)Cl_2.7NH_3.3H_2O$ von ausgiebigster Färbkraft. Es wird in der mikroskopischen Technik als (freilich nicht eindeutiges) Reagenz auf Pektin und Pektinabkömmlinge gebraucht.

Ruthenium(IV)chlorid, $RuCl_4$, darstellbar aus $Ru(OH)_4$ und HCl, ist ein gelbbraunes wasserlösliches Salz.

Ruthenium(III)bromid, $RuBr_3$, aus RuO_2 und HBr, bildet dunkelrote Schuppen.

Ruthenium(III)jodid, RuJ_3, aus K_2RuCl_5 und Jodkalium als schwarzes Pulver erhältlich.

8e) Sonstige Verbindungen. Ruthenium(IV)sulfat, $Ru(SO_4)_2$, entsteht bei der Oxydation von RuS_2 mit Salpetersäure als gelbe Kristallmasse.

9. Spektralchemie. Das äußerst linienreiche Spektrum des Rutheniums harrt noch der genaueren Untersuchung.

10. Kolloidchemie. Die aus Doppelhalogeniden mit Hydrazinhydrat bei Gegenwart von Gummilösung als Schutzkolloid darstellbaren Sole enthalten kolloidales Trioxydhydrat. Aus Ruthenaten entsteht dagegen unter gleichen Bedingungen ein graubraunes, ziemlich beständiges Metallsol.

b) Rhodium.

Rh. Atomgewicht 102,9.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Formarten und physikalische Konstanten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Spektralchemie. 10. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Als Atomgewicht des Rhodiums weist die Tabelle für 1913 den Wert 102,9 auf.

2. Vorkommen. Rhodium ist ein nie fehlender Bestandteil des Osmiridiums und ist in Mengen bis zu 4,6% auch in den meisten Platinerzen enthalten.

3. Geschichte. Von Wollaston wurde das Rhodium zusammen mit dem Palladium im Jahre 1803 entdeckt. An der Erforschung seiner Chemie waren außer Berzelius vor allem Claus, Deville, Debray und Jörgensen beteiligt. — Seinen Namen verdankt das Element der roten Farbe seiner Salze (ῥόδεος, rosenrot).

4. Darstellung und Verwendung. Von den Darstellungsmethoden besitzen die nach Wöhler und Bunsen besonderes Interesse. Nach Wöhler wird das Ausgangsmaterial (Platinrückstände oder feinstverteiltes Osmiridium) mit Chlornatrium vermischt im feuchten Chlorstrom erhitzt, das Reaktionsprodukt ausgelaugt und mit Salmiak gefällt. Aus dem Filtrat vom Iridiumsalmiak kristallisiert Ammoniumrhodiumchlorid, das beim Verglühen Rhodium liefert. Nach Bunsen gewinnt man das Metall durch Chlorieren eines Gemisches von Platinrückständen mit Bariumchlorid und Zersetzung der erhaltenen Bariumverbindungen mit Schwefelsäure. Auf Zusatz von Bisulfat fällt ein Doppelsalz des Rhodiums aus, das beim Erhitzen metallisches Rhodium abscheidet.

Die Ausnutzung der für den Chemiker unschätzbaren Eigenschaften des Rhodiums — Schwerschmelzbarkeit, völlige Indifferenz gegen fast alle chemischen Agenzien bei relativ niedrigem spezifischen Gewicht — verbietet der Preis des Metalls. Eine Legierung mit 90% Pt dient zur Herstellung des Thermoelements für das Pyrometer nach Le Châtelier.

5. Formarten und physikalische Konstanten. Rhodium ist ein dehn- und hämmerbares Metall von silberweißer, in feiner Verteilung schwarzer Farbe. Fp. 1970°. Im Moissanschen Ofen und im Vakuum bei 800° verdampft es. Weitere mit ausreichender Genauigkeit bestimmte Konstanten sind: Dichte 12,1 bis 12,6 (je nach dem Verteilungszustand), spezifische Wärme 0,05803 zwischen 0° und 97°, Ausdehnungskoeffizient 0,00000850 bei 40°, 0,00000858 bei 50°, thermoelektrische Kraft zwischen —78° und +100° (bezogen auf Pb): $2,17 + 0,0005.t$, spezifischer Widerstand bei 100° 6,60, bei 0° 4,70, bei —78,3° 3,09, bei —186° 0,70, spezifische Leitfähigkeit bei —186° $143,0 \times 10^4$, bei —78,3° $32,4 \times 10^4$, bei 0° $21,3 \times 10^4$, bei 100° $15,15 \times 10^4$.

Der durch Glühen von Ammoniumrhodiumchlorid erhaltene Schwamm und das durch Reduktion von Rhodiumsalzlösungen, z. B. mit Hydrazin oder Ameisensäure dargestellte Rhodiumschwarz zeigen

völlige Analogie zu den entsprechenden Formarten des Platins (s. Platin im Artikel „Osmiumgruppe"), auch hinsichtlich der katalytischen Wirksamkeit, die in der Technik zur Entfernung der Ameisensäure aus der Essigsäure ausgenutzt wird.

Das bei der Zerlegung von Rh-Zn- und Rh-Pb-Legierungen mit Salz- bezw. Salpetersäure hinterbleibende „explosive" Metall ist keine allotrope Modifikation; die Explosivität beruht vielmehr auf Einschlüssen von Wasserstoff bezw. Stickoxyd, deren Vereinigung mit Sauerstoff beim Erwärmen infolge der katalytischen Beschleunigung durch das fein verteilte Rhodium momentan erfolgt. Der früher als Beweis für die Allotropie angeführte, übrigens nur scheinbare Unterschied zwischen den beiden Modifikationen bezüglich der Löslichkeit in Königswasser findet seine Erklärung in der leichten Passivierbarkeit des Rhodiums durch Salpetersäure; kathodische Reaktivierung in Zitronensäurelösung macht auch das explodierte Metall leicht angreifbar.

6. Valenz und Elektrochemie. Das Rhodium wird allgemein als mehrwertig angesehen, obwohl nur für die Dreiwertigkeit in der Isomorphie des K_3RhCy_6 mit den entsprechenden Kobalt- und Eisensalzen und in der Fähigkeit zur Alaunbildung hinreichende Anhaltspunkte vorhanden sind. Als zweiwertig erscheint das Element in den Oxydulverbindungen (RhO, $RhCl_2$), als vierwertig im Dioxyd RhO_2, für höhere Sauerstoffverbindungen sind Anzeichen vorhanden.

Ueber den Lösungszustand der Rhodiumverbindungen in Wasser ist kaum etwas bekannt, man wird ähnliche Verhältnisse anzunehmen haben, wie beim Ir und Pt (s. den Artikel „Osmiumgruppe"). Für die Doppelhalogenide gilt das beim Ruthenium Gesagte.

7. Analytische Chemie. 7a) Qualitative Analyse. Rhodiumverbindungen werden von der Boraxperle mit brauner Farbe aufgenommen und hinterlassen auf der Kohle unschmelzbaren Metallschwamm.

Beim Aufschließen mit Bisulfat geben alle Rhodiumverbindungen eine Schmelze, deren gelbgefärbte wässerige Lösung auf Zusatz von Salzsäure rot wird.

Rhodiumsalzlösungen geben mit Kalilauge langsam, schneller auf Zusatz von Alkohol, Fällungen von gelbem, in der Hitze braunem, wasserhaltigem Oxydhydrat.

Ammoniak erzeugt aus konzentrierten Lösungen eine gelbe Fällung.

Schwefelwasserstoff scheidet langsam braunes, in heißer konzentrierter Salpetersäure lösliches Sulfid ab, das mit Schwefelalkalien, nicht aber mit $(NH_4)_2S$, lösliche Sulfosalze bildet.

Kaliumnitrit gibt eine orangegelbe Fällung von Kaliumrhodiumnitrit $[K_3Rh(NO_2)_6]$.

Zinnchlorür erzeugt dunkelbraune kolloidale Lösungen, aber keinen Niederschlag.

Sehr empfindlich ist die durch Oxydation alkalischer Rhodiumsalzlösungen mittels Chlor oder Hypochlorit entstehende Blaufärbung, die durch SO_2 in gelb umschlägt.

7b) Quantitative Analyse. Man scheidet das Rhodium mit Hydrazinhydrat als Metall oder mit überschüssiger Kalilauge als Oxydhydrat ab und wägt nach der Reduktion im Wasserstoffstrom ebenfalls als Metall.

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines Verhalten des Metalls. Die Widerstandsfähigkeit des Rhodiums gegen chemische Agenzien ist eine Funktion seines Verteilungszustandes, seiner Reinheit und seiner Vorbehandlung. Während kompaktes Metall von keinem Reagens mehr als spurenweise angegriffen wird, ist ungeglühtes Rhodiumschwarz schon in konzentrierter Schwefelsäure löslich, geglühtes aber selbst in Königswasser fast unlöslich. Mit unedlen Metallen oder mit viel Platin legiert, geht Rhodium mit Königswasser leicht in Lösung. Weitere wirksame Aufschlußmittel sind schmelzende Phosphorsäure, schmelzende saure Phosphate und Bisulfate.

Eine direkte Vereinigung erfolgt in der Hitze mit Schwefel, von Gasen ist Wasserstoff unwirksam, dagegen bilden Chlor und Sauerstoff mit fein verteiltem Metall bei höheren Temperaturen Verbindungen. Bei etwa 600° überzieht sich das Rhodium mit einem dünnen, leicht rückwärts zerfallenden Oxydhäutchen. Ein reiner Lösungsvorgang ist die das Spratzen des erstarrenden Metalls verursachende Aufnahme von Gasen durch geschmolzenes Rhodium.

Unter den Legierungen des Rhodiums finden sich einige mit ausgeprägtem Verbindungscharakter, so die unter starker Wärmetönung entstehenden Legierungen mit Blei und Zink ($PbRh_2$, $RhZn_2$).

In seinen Verbindungen zeigt Rhodium einige Aehnlichkeit mit dem Kobalt (vgl. z. B. das alkalilösliche Hydroxyd, das dem Fischerschen Salz entsprechende Kaliumrhodiumnitrit, den, absolut genommen, gleichen Drehungsfaktor des Rhodiums als Zentralatom in den optisch aktiven Amminen u. dgl. m.).

8b) Verbindungen des Rhodiums mit Sauerstoff. Das Rhodium(II)oxyd, RhO, entsteht als schwarzes Pulver beim Erhitzen von fein verteiltem Rhodium im Luftstrom oder von $Rh(OH)_3$ unter Erglühen.

Rhodium(III)oxyd, Rh_2O_3, bildet metallglänzende Kristallfasern und wird durch

Erhitzen von $Rh(NO_3)_3$ oder durch Schmelzen von Rhodiumpulver mit BaO_2 oder $Ba(NO_3)_2$ gewonnen. Das zugehörige Hydroxyd $Rh(OH)_3$ wird durch Erhitzen einer Rhodiumsalzlösung mit überschüssigem Alkali in Form eines braunschwarzen Pulvers dargestellt. Ein Hydrat $Rh(OH)_3 . H_2O$ entsteht als zitronengelbe amorphe Fällung in der Kälte allmählich bei Zusatz von wenig Kalilauge und bildet infolge seiner Leichtlöslichkeit in vielen Säuren das vorteilhafteste Ausgangsmaterial für die Rhodiumsalze.

Rhodium(IV)oxyd, RhO_2, entsteht beim Schmelzen von Rhodiummohr mit KOH und KNO_3 als kaffeebraunes, säureunlösliches Pulver.

Fraglich ist die Existenz von höheren Sauerstoffverbindungen, z. B. von RhO_2, dem Anhydrid der unbekannten Rhodiumsäure, H_2RhO_4, deren Kaliumsalz vielleicht die blaue Verbindung ist, die beim Oxydieren alkalischer Rhodiumlösungen mit Chlor (s. oben 7a) erhalten wird.

8c) Verbindungen mit Schwefel. Die direkte Synthese in Schwefeldampf ergibt ein blauweißes, metallisch glänzendes Rhodium(II)sulfid, RhS, das beim Erhitzen leicht wieder zerfällt.

Rhodium(III)sulfid, Rh_2S_3, entsteht aus $RhCl_3$ und Schwefelwasserstoff bei 360° als schwärzlich kristallinisches Pulver. Das zugehörige Sulfhydrat, $Rh(SH)_3$, bildet sich beim Einleiten von Schwefelwasserstoff in Rhodiumsalzlösungen als braunschwarzer amorpher Niederschlag.

8d) Verbindungen mit Halogenen. Die Existenz eines Rhodium(II)chlorids, $RhCl_2$, ist unsicher.

Rhodium(III)chlorid, $RhCl_3$, entsteht beim Erhitzen von Rhodiumschwarz oder von Rh-Sn-Legierungen im Chlorstrom als ziegelrote Kristallmasse und ist, auch in Säuren, ganz unlöslich. Das Hydrat $RhCl_3 . 4H_2O$ resultiert beim Auflösen von $Rh(OH)_3$ in Salzsäure und Eindampfen als glasige, leicht lösliche Masse, die wie die meisten Rhodiumsalze nur schwer in kristallinischer Form zu erhalten ist.

Rhodium(III)bromid, $RhBr_3$, wird dargestellt durch Erhitzen von Rhodiumschwarz mit Brom und Bromwasserstoff im geschlossenen Rohr, bildet schwärzliche Kristalle und geht beim Erwärmen mit Jodkaliumlösung in schwarzes Rhodium(III)-jodid, RhJ_3, über.

Von den sehr zahlreichen Doppelhalogeniden sei nur das tiefrote $Na_3RhCl_6 . 12H_2O$ erwähnt, das nach dem Wöhlerschen Verfahren als Zwischenprodukt bei der Rhodiumdarstellung gewonnen wird und infolge seiner Unlöslichkeit in Alkohol die Trennung des Rhodiums von den meisten anderen Platinmetallen gestattet. Von den Rhodiumamminen haben die Aethylendiammine wegen ihres Drehungsvermögens besonderes Interesse (s. Kobalt im Artikel „Eisengruppe").

8e) Sonstige Verbindungen. Rhodium(III)nitrat, $Rh(NO_3)_3 . 2H_2O$, aus $Rh(OH)_3$ und Salpetersäure darstellbar, bildet eine gelbrote hygroskopische Masse.

Rhodium(III)sulfat, $Rh_2(SO_4)_3 . 12 H_2O$, in analoger Weise erhältlich, ist von weißlich zitronengelber Farbe und liefert mit Bisulfaten schwer lösliche Doppelsalze.

9. Spektralchemie. Genauere Untersuchungen über das linienreiche Rhodiumspektrum fehlen.

10. Kolloidchemie. Rhodium läßt sich in kolloidaler Form nach Bredig durch Zerstäubung von Rhodiumdrähten mit schwachen hochgespannten Strömen in Wasser von der Leitfähigkeit 1×10^{-6} darstellen. Es bildet eine braune Flüssigkeit mit grauen, sehr feinen ultramikroskopischen Teilchen vom Durchmesser 5 $\mu\mu$, die die Brownsche Molekular- und die Duboissche Kurvenbewegung zeigen. Die Leitfähigkeit dieser Sole ist 1×10^{-6}, der Metallgehalt beträgt 0,2 g pro Liter. — Aus Natriumrhodiumchloridlösung entsteht mit Akrolein ein gelbes, mit Allylalkohol ein gelbgraues bis dunkelbraunes Sol. Ferner gibt auch Hydrazinhydrat (1 : 2000) mit Rhodiumchloridlösung (1 : 1000) bei Gegenwart einiger Tropfen einprozentiger Gummilösung als Schutzkolloid ein tiefbraunes lichtbeständiges Sol, das sich nach der Dialyse im Vakuum zu einem wasserlöslichen Gel eindampfen läßt.

c) Palladium.

Pd. Atomgewicht 106,7.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Formarten und physikalische Konstanten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Spektralchemie. 10. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Nach der Tabelle für 1913 ist das Atomgewicht des Palladiums 106,7.

2. Vorkommen. Die meisten Platinerze führen Palladium in Mengen von etwa 2%, reich daran ist der brasilianische Gold- und Platinsand, während der Palladiumgehalt vieler Silbererze nur geringe Bedeutung besitzt; erwähnt sei schließlich auch das Vorkommen in den Selenmineralien von Tilkerode im Harz.

3. Geschichte. Gleichzeitig mit Rhodium wurde das Element 1803 von Wollaston aufgefunden. Die Chemie des Palladiums ist von Berzelius, Deville, in jüngster Zeit besonders von Paal und L. Wöhler ausgebaut worden.

4. Darstellung und Verwendung. Palladium reichert sich bei der Platindarstellung in den Mutterlaugen des Platin-, Iridium- und Rhodiumsalmiaks an und wird daraus mit Eisen oder Zink gefällt. Nach dem Glühen mit Salmiak extrahiert man diesen Niederschlag mittels Salpetersäure, neutralisiert mit Soda und schlägt das Palladium mit Cyanquecksilber als Cyanid $Pd(CN)_2$ nieder, oder man leitet in die mit Chlorkalium versetzte saure Lösung Chlor, wobei Kaliumchloropalladat, K_2PdCl_6, ausfällt. Beide Verbindungen hinterlassen nach dem Glühen und Auswaschen reines Palladium als Schwamm. — Aus den Lösungen des Palladiumgoldes in Königswasser wird das Palladium, wie angegeben, als Cyanid abgeschieden.

Verwendung findet das Metall zur Herstellung von Kreisteilungen und Skalen an wissenschaftlichen, insbesondere an astronomischen Instrumenten, die Zahntechnik benutzt es in verschiedenen Legierungen. Da es von Schwefelwasserstoff nicht geschwärzt wird, überzieht man silberne und versilberte Geräte, z. B. die Hohlspiegel der Scheinwerfer zur Erhaltung und Steigerung ihres Glanzes in dünner Schicht elektrolytisch mit Palladium. Weitere Anwendungen s. unter 7 und 8.

5. Formarten und physikalische Konstanten. Palladium ist ein geschmeidiges, dehn- und schmiedbares, silberweißes Metall von großer Politurfähigkeit. Seine Dichte ist 11,4 (als Schwamm) bis 11,9 (geschmolzen). Es besitzt unter den Platinmetallen den niedrigsten Schmelzpunkt: Fp. 1549°. Die latente Schmelzwärme beträgt 36,3 Kal. Im Knallgasgebläse, im elektrischen Ofen und im Vakuum bei etwa 750° verflüchtigt sich das Metall mit grünem Dampf.

Die spezifische Wärme ist 0,0528 zwischen —186° und 18°, 0,0592 zwischen 0° und 100°, 0,0714 zwischen 0° und 1265°, der Ausdehnungskoeffizient 0,00001176 bei 40°, 0,00001192 bei 50° entsprechend der Gleichung $l_t = l_0 . (1 + 11{,}303 \times 10^{-6} t + 0{,}006007 \times 10^{-6} t^2)$.

Die Leitfähigkeit hat die Werte: $35{,}93 \times 10^4$ bei —183°, $13{,}95 \times 10^4$ bei —78°, $9{,}79 \times 10^4$ bei 0°, $7{,}25 \times 10^4$ bei 98,5°, $5{,}87 \times 10^4$ bei 194,2°.

Ein „explosives" Pd ist nicht bekannt; über Palladiumschwamm und Palladiumschwarz s. unter 8.

6. Valenz und Elektrochemie. Palladium fungiert in seinen meisten Verbindungen als zweiwertiges Element; in den außerdem bekannten Valenzstufen als drei- und vierwertiges Metall in den Oxyden Pd_2O_3 bezw. PdO_2 ist es erheblich unbeständiger.

Das elektrochemische Verhalten des Palladiums zeigt in allen wesentlichen Punkten, wie in der Neigung zur Bildung leicht hydrolysierbarer Anionenkomplexe und in der verwickelten Sekundärdissoziation, weitestgehende Analogien zum Platin (im Artikel „O s m i u m g r u p p e"), auf das deshalb verwiesen sei. Pd-Ionen entstehen sicher schon bei der primären Dissoziation der Palladosalze in nennenswertem Maße, doch geben die vorderhand nur qualitativ durchgeführten Versuche keinen Aufschluß über den Betrag dieses Zerfalls.

7. Analytische Chemie. 7a) Q u a l i t a t i v e A n a l y s e. Alle Palladiumverbindungen lassen sich mit Kaliumbisulfat aufschließen und geben beim Schmelzen mit Natriumsuperoxyd ein mit gelber Farbe lösliches Palladat, das mit Salzsäure neutralisiert, auf Zusatz von Chlorkalium und Salpetersäure rubinrotes Kaliumchloropalladat, K_2PdCl_6, abscheidet.

Lösliche Palladiumverbindungen geben folgende Reaktionen: Schwefelwasserstoff fällt schwarzes Palladosulfid PdS, unlöslich in $(NH_4)_2S$, löslich in kochender Salzsäure und in Königswasser.

Kalilauge scheidet braune, im Ueberschuß lösliche basische Salze ab, auf Zusatz von Kaliumnitrit zu der alkalischen Lösung entsteht der kristallinische Niederschlag eines gelben Doppelnitrits.

Natriumkarbonat fällt braunes Oxydhydrat, das sich im Ueberschuß löst, beim Kochen aber wieder ausscheidet.

Ueberschüssiges Ammoniak löst die anfangs entstehende fleischrote Fällung von $PdX_2 . Pd(NH_3)_4X_2$ ($X = Cl, NO_3$ usw.) auf zu $Pd(NH_3)_4X_2$; Salzsäure zersetzt dieses Amminsalz zu gelbem, kristallinischem Palladosamminchlorid $Pd(NH_3)_2Cl_2$.

Ammonium- und Kaliumchlorid erzeugen rotbraune Komplexsalze, von denen $(NH_4)_2PdCl_4$ leicht, K_2PdCl_4 schwer löslich ist.

Kaliumjodid und Quecksilbercyanid geben die für Palladium charakteristischsten Fällungen: KJ das in Wasser und Alkohol unlösliche, in Ammoniak und überschüssigem KJ lösliche, schwarze PdJ_2, $Hg(CN)_2$ das in Cyankali und Ammoniak leicht, in Salzsäure schwer lösliche, gelblichweiße $Pd(CN)_2$.

Die meisten Reduktionsmittel, auch Alkohol und Kohlenoxyd schlagen metallisches Pd nieder.

7b) Q u a n t i t a t i v e A n a l y s e. Man scheidet das Palladium aus seinen Lösungen mit Jodkalium als PdJ_2 ab und bestimmt als solches, oder man fällt mit Merkuricyanid oder mit Cyankali und Essigsäure als $Pd(CN)_2$ und wägt nach dem Glühen als Metall. In gleicher Form läßt sich das Palladium auch direkt bestimmen nach Reduktion seiner Lösungen mit Hydrazinhydrat.

Elektrolytisch bringt man das Metall aus

ammoniakalischer oder aus phosphorsaurer, dinatriumphosphathaltiger Lösung an versilberten Platinkathoden zur Abscheidung.

In der analytischen Chemie findet das Palladium seinerseits Anwendung bei einigen wichtigen Reaktionen, die hier kurz angedeutet seien. Palladiumschwamm oder palladinierter Asbest dient in der Gasanalyse zur Trennung von Wasserstoff und gesättigten Kohlenwasserstoffen durch fraktionierte Verbrennung, da z. B. Methan erst oberhalb 450° in Gegenwart des katalytisch wirkenden Metalls oxydiert wird. Die vorherige Mischung der Gase mit Luft kann man umgehen, wenn man als Katalysator palladiniertes Kupferoxyd benutzt. Eine Lösung von pikrinsaurem Natrium und kolloidalem Palladium ist verwendbar als Absorptionsflüssigkeit für Wasserstoff, der intermediär vom Palladium gelöst, durch das in Triamidophenol übergehende Pikrat oxydiert wird. — Aus einer neutralen Lösung von Palladochlorid wird durch reduzierende Gase metallisches Pd abgeschieden, sie dient daher als Reagens auf Kohlenoxyd, Aethylen usw. — In der Gewichts- und Maßanalyse gebraucht man Palladiumchlorid zur Abscheidung und Trennung des Jods von den anderen Halogenen.

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines Verhalten des Metalls. Der allen Elementen der Platingruppe eigene Edelmetallcharakter ist beim Palladium am wenigsten ausgeprägt; die Widerstandsfähigkeit des Metalls gegen chemische Agenzien ist kaum größer als die des Silbers. Wie dieses löst es sich glatt in Salpetersäure, in fein verteiltem Zustande wird es auch von Salzsäure, Jodwasserstoffsäure und Schwefelsäure leicht aufgenommen. Ebenso bringen schmelzende Bisulfate und anderthalbprozentige Cyankalilaugen das Metall in Lösung, während Nitrate stark oxydierend wirken.

Bei Temperaturen oberhalb 200° überzieht sich das Palladium mit einer dünnen oberflächlichen Oxydschicht, die in der Glühhitze wieder verschwindet. Chlor greift das fein verteilte Metall ziemlich energisch an, Kohlenoxyd bildet noch nicht genauer untersuchte, nicht flüchtige Verbindungen (Palladiumkarbonyle?), die sich bei 250° heftig zersetzen.

Von besonderem Interesse ist die Absorption des Wasserstoffs durch Palladium. Die Aufnahme des Gases ist von einer Vermehrung des Eigenvolumens des Metalls begleitet, die sich sehr schön sichtbar machen läßt, wenn man ein Palladiumblech kathodisch mit H_2 beladet; die der Anode zugekehrte Seite des Bleches wird konvex. Das absorbierte Gas wird beim Erhitzen und unter spontaner Erwärmung allmählich auch von selbst abgegeben, in diesem Falle wahrscheinlich unter katalytischer Oxydation des Wasserstoffs. Ein kleiner Rest des Gases wird jedoch auch bei langem Auspumpen zurückgehalten, und ein im Vakuum von 0,15 mm elektrisch erhitztes Palladiumblech gibt ein von Residualgasen herrührendes Glimmlicht, in dessen Spektrum Wasserstoff nachweisbar ist.

Die absorbierte Gasmenge ist bei konstanter Temperatur der Quadratwurzel aus dem Wasserstoffdruck proportional, von einem bestimmten Sättigungsgrade an folgt die Löslichkeit annähernd dem Henryschen Gesetz. Danach sind die anfänglich aufgenommenen Gasmengen atomar gelöst, wofür auch die Diffusionsgeschwindigkeit spricht, die dem Quadratwurzelgesetz gehorcht und auf Diffusion von Wasserstoffatomen deutet. Der zur Sättigung erforderliche Gasrest wird dagegen in molekularer Form aufgenommen.

Ueber die absorbierte Maximalmenge des Gases schwanken die Angaben zwischen 643 und 862 Volumina, den empirischen Formeln Pd_2H und Pd_3H_2 mit einiger Annäherung entsprechend. Doch ist die Existenz derartiger Verbindungen zweifelhaft. Weder die Kurven der Zersetzungsspannung, noch die elektrische Leitfähigkeit geben einen sicheren Anhalt für oder wider die Existenz der Palladiumhydrüre. Die Annahme zweier nicht mischbarer fester Lösungen von atomarem und molekularem Wasserstoff in Palladium dürfte den Tatsachen am meisten gerecht werden, wobei die Frage nach den Gleichgewichten in diesem System vorderhand offen bleiben muß.

Der „Palladiumwasserstoff" besitzt reduzierende Eigenschaften, und da das Lösungsvermögen des Palladiums für Wasserstoff um so größer wird, je feiner verteilt das Metall ist, so verwendet man mit Vorteil den durch Glühen von Palladosamminchlorid oder Ammoniumpalladiumchlorid erhaltenen Schwamm oder das durch Zersetzung von Palladiumchloridlösungen mittels Hydrazinhydrat dargestellte Schwarz zur katalytischen Beschleunigung von Reduktionen. Dem gleichen Zweck dient Zink, das durch Eintauchen in eine Palladiumchloridlösung mit einer dünnen Schicht von Palladiummohr überzogen worden ist, ein noch höheres Reduktionsvermögen besitzt das Palladiumsol (s. unter 10). Die Wirksamkeit des Palladiums beruht im wesentlichen auf einer Spaltung des Wasserstoffmoleküls, und der vom Metall mit geringer Haftfestigkeit atomar gelöste Wasserstoff wirkt in statu nascendi energisch reduzierend.

In seinen Verbindungen zeigt Palladium Aehnlichkeit mit dem Platin, weniger mit dem Nickel (vgl. z. B. die bevorzugte Zwei-

wertigkeit, die Verbindungen mit Kohlenoxyd u. dgl.).

8b) Verbindungen mit Sauerstoff. Ein Palladium(I)oxyd existiert nicht, die dafür angesprochenen Produkte sind Gemische von Pd und PdO.

Palladium(II)oxyd, PdO, entsteht mit wechselnden Mengen von Hydratwasser bei der Hydrolyse von $Pd(NO_3)_2$ oder aus K_2PdCl_4 und Kalilauge als dunkelbraune Masse. Mit sinkendem Wassergehalt und steigender Temperatur dunkelt die Farbe. Das in der Kälte frisch gefällte Oxydhydrat PdO.x aq löst sich leicht in Alkalien und Säuren, heiß gefälltes ist nur noch in Säuren löslich. Wasserstoff reduziert das Oxyd unter spontaner Erwärmung.

Palladium(III)oxyd, Pd_2O_3, entsteht bei etwa einstündiger Elektrolyse einer stark gekühlten Lösung von $Pd(NO_3)_2$ in normaler Salpetersäure bei einer Stromdichte von 0,5 Amp. pro cm^2. Auch durch Oxydation von PdO mittels Ozon in halbnormaler Salpetersäure gelangt man zur gleichen Verbindung. Pd_2O_3 ist ein brauner, amorpher Körper; die salzsaure Lösung spaltet Chlor ab und enthält leicht zersetzliches Palladium(III)chlorid, $PdCl_3$, das mit KCl und RbCl Salze vom Typus X_2PdCl_5 liefert.

Palladium(IV)oxyd, PdO_2, durch Oxydation schwach alkalischer Palladiumchlorürlösungen mittels Ozon darstellbar, ist ein schwarzes Pulver, und auch als Hydrat $PdO_2.2H_2O$ bekannt. Es beginnt bei 200° in PdO und Sauerstoff zu zerfallen und ist ein starkes Oxydationsmittel.

8c) Verbindungen mit Schwefel. Palladium(II)sulfid, PdS, aus den Elementen als bläulichweiße, metallisch glänzende Masse erhältlich; auch aus Palladiumsalzlösungen durch Schwefelwasserstoff mit schwarzbrauner Farbe fällbar.

Palladium(IV)sulfid, PdS_2, wird als dunkelbraunschwarzer, amorpher Körper aus einer Schmelze von PdS mit Soda und Schwefel durch Ansäuern dargestellt.

8d) Verbindungen mit Halogenen. Palladium(II)chlorid, $PdCl_2$, dunkelbraune, amorphe Masse, durch Auflösen von Palladium in Königswasser erhalten. In der dunkelroten salzsauren Lösung liegt wahrscheinlich die Komplexsäure H_2PdCl_4 vor. Das Hydrat $PdCl_2.2H_2O$ kristallisiert beim Eindampfen im Vakuum und bildet mit Silbernitrat ein Salz von der Formel $Ag_2[(OH)_2PdCl_2]$, spaltet also in wässeriger Lösung das Anion $[(OH)_2PdCl_2]''$ ab.

Palladium(III)chlorid, $PdCl_3$, s. 8b.

Palladium(IV)chlorid, $PdCl_4$, ist nur in stark königswasserhaltiger Lösung existenzfähig, zerfällt beim Eindampfen und Verdünnen in $PdCl_2$ und Chlor, und gibt mit Chlorkalium rotes Chlorpalladat K_2PdCl_6.

Palladium(II)bromid, $PdBr_2$, entsteht beim Auflösen von Palladium in Salpeter- und Bromwasserstoffsäure als dunkelbraune Masse.

Palladium(II)jodid, PdJ_2, fällt als unlöslicher, schwarzer Niederschlag beim Zusatz von Jodkalium zu einer Palladiumsalzlösung (s. auch 7).

Palladium(II)cyanid, $Pd(CN)_2$, als gelblichweißer, amorpher Körper aus Palladiumsalzlösungen und Cyanquecksilber darstellbar.

8e) Sonstige Verbindungen. Palladium(II)nitrat, $Pd(NO_3)_2$, bildet rhombische, zerfließliche, braune Nadeln und entsteht durch Auflösen von Palladium in Salpetersäure.

Palladium(II)sulfat, $PdSO_4.2H_2O$, braune Kristalle, durch Eintragen von Palladium in ein Gemisch von Schwefel- und Salpetersäure darstellbar.

9. Spektralchemie. Das Funkenspektrum der Palladiumsalze weist folgende charakteristische Linien auf: 573,6, 569,5, 566,9 im Gelbgrün, **554,7**, 539,5, **529,6**, 516,4, **511,7** im Grün, 487,5, 481,8, 478,8, 447,4 im Blau und 421,3 im Violett. Die fettgedruckten Linien sind am deutlichsten.

10. Kolloidchemie. Kolloidales Palladium läßt sich durch Zerstäubung von Drähten in $^n/_{1000}$ Natronlauge darstellen, auch durch vorsichtige Reduktion von Palladochloridlösungen mittels Akrolein oder Hydrazinhydrat bei Gegenwart von sehr verdünnter Gummilösung, besser von protalbinsaurem Natrium als Schutzkolloid. Die entstehenden Sole haben dunkelbraune Farbe, sind sehr beständig und lassen sich nach der Dialyse durch Eindampfen in Form schwarzer, glänzender Lamellen gewinnen. Sie lösen Wasserstoff in noch reicherem Maße als Palladiumschwarz und besitzen infolgedessen ein sehr intensives und für die organische Chemie wertvolles Reduktionsvermögen. Den älteren Methoden gegenüber besitzt die Hydrierung durch kolloidalen „Palladiumwasserstoff" die Vorzüge, daß der Prozeß bereits bei gewöhnlicher Temperatur ohne Nebenreaktionen verläuft, also nur geringe Substanzmengen erfordert und daß sich die Wasserstoffanlagerung vor allem auf Kohlenstoffdoppelbindungen, auch bisher unangreifbare, nicht aber auf Sauerstoffdoppelbindungen erstreckt, so daß z. B. der Karbonylsauerstoff der Ketone unangegriffen bleibt.

Literatur. ***O. Dammer***, *Handbuch der anorganischen Chemie. Stuttgart 1893 und 1903.* — ***Graham-Otto***, *Ausführliches Lehrbuch der anorganischen Chemie. Braunschweig 1889.*

F. Sommer.

Rütimeyer

Ludwig.

Geboren am 26. Februar 1825 in Biglen im Kanton Bern; gestorben am 25. November 1895 in Basel. Er studierte anfangs in Bern Theologie, dann Medizin. Nach Abschluß seiner Studien machte er Reisen nach Frankreich, England und Italien. Er habilitierte sich 1854 in Bern, folgte aber schon im nächsten Jahre einem Ruf als ordentlicher Professor der Zoologie und Anatomie nach Basel. Seine Studien betrafen neben den zoologischen die verschiedensten verwandten Gegenstände, so Geologie, Anthropogenie und Geographie. Er schuf sich so die Vorbedingungen zu seinen klassischen Arbeiten der Grenzgebiete, davon legen Zeugnis ab seine 1860 erschienenen Arbeiten der Pfahlbauten, sowie seine umfangreichen Studien über die Naturgeschichte der fossilen und lebenden Huftiere. Diese letzteren Veröffentlichungen, die sich über 20 Jahre ausdehnten, gehören zu den sorgsorgfältigsten und überzeugendsten phylogenetischen Spezialarbeiten über große Formenreihen von Wirbeltieren. Seine bedeutendste Schrift ist „die Herkunft unserer Tierwelt" (1867). Er verknüpft hier die Stammesgeschichte der höheren Landtiere und ihre geographische Verbreitung zu einem Gesamtbild; eine Methode, die als vorbildlich für die Wertung der verschiedenen Urkunden der Tierkunde gelten kann. Von seinen Arbeiten sind sonst noch zu erwähnen: „Vom Meere bis nach den Alpen" (Bern 1854), „Untersuchung der Tierreste aus den Pfahlbauten der Schweiz" (Zürich 1860), „Die Fauna der Pfahlbauten in der Schweiz" (Basel 1861), „Beiträge zur Kenntnis der fossilen Pferde und zu einer vergleichenden Odontographie im allgemeinen" (Basel 1863), „Versuch einer natürlichen Geschichte des Rindes in seinen Beziehungen zu den Wiederkäuern im allgemeinen" (2 Tle., Zürich 1866 bis 1867), „Die fossilen Schildkröten von Solothurn und der übrigen Juraformation" (2 Tle., Zürich 1866 bis 1873), „Die Rinder der Tertiärepoche nebst Vorstudien zur natürlichen Geschichte der Antilopen" (2 Tle., Genf 1878, 1879). „Ueber die Art des Fortschritts in den organischen Geschöpfen" (Basel 1876). „Beiträge zu einer natürlichen Geschichte der Hirsche (3 Tle., Genf 1880 bis 1884), „Beiträge zu der Geschichte der Hirschfamilie" (2 Tle., Basel 1881 bis 1883).

Literatur. ***C. Schmidt,*** *Verhandl. d. schweizer. Naturforsch. Gesellsch. 1895 (dort auch chronol. Verzeichnis der Schriften). Allgemeine deutsche Biographie, Bd. 53, 1907.* — ***Iselin,*** *Karl Ludwig Rütimeyer. Basel 1897.*

W. Harms.

S.

Sachs

Julius.

Geboren in Breslau a. 2. Oktober 1832. Besuchte das Gymnasium daselbst, studierte in Prag, wo er Assistent von Purkinje wurde und sich als Privatdozent für Botanik habilitierte. 1859 ging er als Assistent an die Forstakademie nach Tharand, 1861 als Professor an die Landwirtschaftliche Hochschule nach Bonn-Poppelsdorf. 1867 wurde er in gleicher Eigenschaft an die Universität Freiburg i. Br., ein Jahr später nach Würzburg berufen. Dort wirkte er, zahlreiche Berufungen nach Berlin, Wien usw. ablehnend, bis zu seinem Tode (29. Mai 1897). Er war einer der bedeutendsten Botaniker. Durch seine Arbeiten wurde die experimentelle Pflanzenphysiologie, welche von der morphologischen und entwickelungsgeschichtlichen Richtung (Mohl, Hofmeister u. a.) in den Hintergrund gedrängt war, neu belebt und nahm einen mächtigen Aufschwung. Er selbst untersuchte u. a. die Bildung der Stärke im Licht und ihr Verschwinden im Dunkeln, die Wanderung der Assimilate (1861 bis 1864), die Assimilationsbedingungen des Chlorophylls (1864 und spätere Arbeiten), die Mechanik des Wachstums (1882 bis 1887), die Bedingungen der Blütenbildung u. a. Diese Arbeiten sind zum großen Teil in den „Arbeiten des botanischen Instituts Würzburg" niedergelegt. Seine „Gesammelten Abhandlungen über Pflanzenphysiologie" erschienen in Leipzig 1892 bis 1893 (2 Bände). In weite Kreise drangen seine meisterhaften Lehrbücher, so das „Lehrbuch der Botanik" (Leipzig 1868, 4. Aufl. 1874) das „Handbuch der Experimentalphysiologie der Pflanzen" (ebenda 1865), die „Vorlesungen über Pflanzenphysiologie" (Ebenda 1882, 2. Aufl. 1887). Ueberaus anregend hat auch seine glänzende „Geschichte der Botanik vom 16. Jahrhundert bis 1860" (München 1875) gewirkt.

Literatur. *Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Bd. XII, 1897, S. 495 bis 496; Allgemeine Deutsche Biographie LIII, 1907, 682 bis 685.*

W. Ruhland.

Saiger

= senkrechte Schichten- oder Gangstellung (vgl. den Artikel „Schichtenbau").

Saigerung.

In der Hüttentechnik: Die Anreicherung der schweren Erze durch Ausschlämmen des leichteren Materials mittels bewegten Wassers. In der Petrographie: Die bei der Abkühlung der Schmelzflüsse vorsichgehende Anreicherung gewisser Bestandteile (Eisen, Magnesia, Kalk) in den ersten Kristallisationsprodukten (vgl. den Artikel „Mineral- und Gesteinsbildung aus dem Schmelzfluß").

Säkulare Hebungen und Senkungen.

Als solche bezeichnet man langsame, nur nach Ablauf großer Zeiträume beobachtbare Bewegungen der Erdrinde (vgl. den Artikel „Niveauverschiebungen").

Salband.

Bezeichnet bei Gängen die Gangwandung (vgl. den Artikel „Lagerungsform der Gesteine").

Salsen.

Siehe „Schlammvulkane".

Salze.

1. Begriff und Bildungsweise. 2. Einteilung. 3. Formelbildung. 4. Bezeichnung. 5. Saure Salze. 6. Basische Salze. 7. Hydrate, gemischte und Doppelsalze. 8. Elektrolytische Dissoziation. 9. Hydrolytische Dissoziation. 10. Löslichkeit. 11. Lösungswärme. 12. Löslichkeitsprodukt. 13. Löslichkeitsbeeinflussung. 14. Gleichgewicht von Anhydrid und Hydraten. 15. Doppelsalzbildung. 16. Ausscheidungsfolge und doppelte

Umsetzung. 17. Komplexsalze: a) Begriff und Bildungsweise. b) Nachweis. c) Beständigkeit. d) Bezeichnung. e) Struktur- und Spiegelbildisomerie.

1. Begriff und Bildungsweise. Salze nennt man alle Elektrolyte, welche weder Säuren noch Basen sind. Sie bilden sich bei der Vereinigung von Säuren oder Säureanhydriden mit Basen oder Basenanhydriden, Salpetersäure und Kalilauge gibt z. B. Kaliumnitrat und Wasser:

$$HNO_3 + KOH = KNO_3 + H_2O,$$

Kohlensäureanhydrid und Calciumhydroxyd gibt Calciumkarbonat und Wasser:

$$CO_2 + Ca(OH)_2 = CaCO_3 + H_2O,$$

Salzsäure und Ammoniak gibt Ammoniumchlorid:

$$HCl + NH_3 = NH_4Cl.$$

Diesen Vorgang nennt man Neutralisation.

Die Salze der sauerstofffreien Säuren können auch durch direkte Vereinigung von Metallen und Metalloiden entstehen, z. B.

$$2Na + Cl_2 = 2NaCl$$
$$Fe + S = FeS.$$

2. Einteilung. Die einfachen Salze, von denen hier zunächst nur die Rede sein soll, teilt man ein in neutrale, saure und basische Salze.

Als neutrale Salze bezeichnet man Salze, bei denen sämtliche als H·-Ionen in wässeriger Lösung abdissoziierbaren H-Atome der Säure, aus der das Salz entstanden ist, durch Metallatome ersetzt sind, oder, was dasselbe ist, Salze, bei denen sämtliche als OH'-Ionen in wässeriger Lösung abspaltbaren Hydroxylgruppen der Base, aus der das Salz entstanden ist, durch Säureradikale ersetzt sind. Enthält das Salz noch H-Atome, die durch Metalle ersetzbar sind, so nennt man es sauer, enthält es noch OH-Gruppen, die durch Säurereste ersetzbar sind, so nennt man es basisch.

3. Formelbildung. Die Formeln der neutralen Salze lassen sich nach folgenden Regeln ableiten:

Haben die Säureradikale und Metalle, welche sich zu Salzen vereinigen, die gleiche Wertigkeit, so verbindet sich ein Radikal der Säure mit einem Atom des Metalls. Dies ist der Fall z. B. bei Natriumchlorid NaCl und Kaliumnitrat KNO_3, bei denen Säureradikale und Metalle 1-wertig sind; bei Calciumkarbonat $CaCO_3$ und Bariumsulfat $BaSO_4$, bei denen die Metalle und Säureradikale 2-wertig sind; bei Aluminiumphosphat $AlPO_4$, bei dem Metall und Säureradikal 3-wertig und bei Zinnsilikat $SnSiO_4$, bei dem Metall und Säureradikal 4-wertig ist.

Ist die Wertigkeit des Metalls oder des Säureradikals, aus denen das Salz besteht, ein ganzes Vielfaches des anderen, so kann ein Atom oder Radikal des Mehrwertigen so viele Atome oder Radikale des Minderwertigen binden, wie das Verhältnis der Wertigkeiten angibt. So ist z. B. im Zinkjodid ZnJ_2 das Metall 2-, das Säureradikal 1-wertig; im Eisennitrat $Fe(NO_3)_3$ das Metall 3-, das Säureradikal 1-wertig; im Zinnchlorid $SnCl_4$ das Metall 4-, das Säureradikal 1-wertig; im Silbersulfat Ag_2SO_4 das Metall 1-, das Säureradikal 2-wertig; im Natriumphosphat Na_3PO_4 das Metall 1-, das Säureradikal 3-wertig und im Kaliumsilikat K_4SiO_4 das Metall 1-, das Säureradikal 4-wertig.

Ist das Verhältnis der Wertigkeiten eine gebrochene Zahl, so bildet man das Produkt der Wertigkeiten, dividiert dieses durch die Wertigkeit des Metalls bezw. des Säureradikals und findet so die Verbindungszahlen, z. B. Ferrisulfat $Fe_2(SO_4)_3$, hier ist das Metall 3- und das Säureradikal 2-wertig; Bariumphosphat $Ba_3(PO_4)_2$, hier ist das Metall 2- und das Säureradikal 3-wertig; Zinnphosphat $Sn_3(PO_4)_4$, hier ist das Metall 4- und das Säureradikal 3-wertig; Aluminiumsilikat $Al_4(SiO_4)_3$, hier ist das Metall 3- und das Säureradikal 4-wertig.

4. Bezeichnung. Die Namen der Salze werden nach der neueren Nomenklatur in der Weise gebildet, daß man an den Namen des Metalls den Namen der salzbildenden Säure anhängt. Nach der älteren Nomenklatur werden die Salze der sauerstofffreien Säuren in der Weise bezeichnet, daß man erst das Metalloid und dann das Metall nennt und die Salze der sauerstoffhaltigen Säuren, indem man vor den Namen des Metalloxyds als Adjektiv die Bezeichnung der Säure voranstellt.

Als Beispiele für diese Bezeichnungen seien im folgenden einige Salze in der Weise angeführt, daß zuerst der Name nach der neueren und dann nach der älteren Nomenklatur genannt wird. Die neuere Nomenklatur ist die gebräuchlichere.

a) Salze der sauerstofffreien Säuren:

NaCl — Natriumchlorid — Chlornatrium,
ZnJ_2 — Zinkjodid — Jodzink,
CaS — Calciumsulfid — Schwefelcalcium.

b) Salze sauerstoffhaltiger Säuren:

KNO_3 — Kaliumnitrat — salpetersaures Kali,
$NaNO_2$ — Natriumnitrit — salpetrigsaures Natron,
$BaSO_4$ — Bariumsulfat — schwefelsaurer Baryt,
$CaSO_3$ — Calciumsulfit — schwefligsaurer Kalk.

Bei der lateinischen Bezeichnung der Salze, die im Handel zum Teil noch gebräuchlich ist, nennt man das Metall als Substantiv und fügt die Bezeichnung der

Säure als Adjektiv hinzu, z. B. Natrium chloratum Natriumchlorid. Ueber die lateinische Bezeichnung der Säuren und Basen vgl. die Artikel „Säuren" (anorganische Säuren) und „Basen" (anorganische Basen).

Kann ein Metall in zwei Wertigkeitsstufen Salze bilden, so bezeichnet man nach der älteren Nomenklatur bei den Salzen der sauerstoffreien Säuren die niedrigere Wertigkeitsstufe durch die Endung -ür, die höhere durch die Endung -id, und bei den Salzen der sauerstoffhaltigen Säuren die niedrigere Wertigkeitsstufe mit -oxydul und die höhere mit -oxyd. Nach der neueren Nomenklatur gebraucht man in beiden Fällen den lateinischen Namen des Metalls und fügt zwischen Metall- und Säurenamen zur Bezeichnung der niedrigeren Oxydationsstufe ein o und zur Bezeichnung der höheren ein i ein:

$HgCl$ — Mercurochlorid — Quecksilberchlorür

$HgCl_2$ — Mercurichlorid — Quecksilberchlorid

$FeSO_4$ — Ferrosulfat — schwefelsaures Eisenoxydul

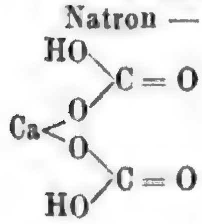
$Fe_2(SO_4)_3$ — Ferrisulfat — schwefelsaures Eisenoxyd.

Eine andere Nomenklatur, welche der großen Anzahl von Oxydationsstufen, wie sie besonders bei den selteneren Elementen, z. B. Vanadin, auftreten, besser Rechnung trägt, hat A. Werner in seinem Werk „Neuere Anschauungen auf dem Gebiet der anorganischen Chemie" (Braunschweig 1909, S. 83ff.) vorgeschlagen. Nach dieser wird die 1-, 2-, 3-, 4-, 5-, 6-, 7- und 8 Wertigkeit der Reihe nach durch die Buchstaben a, o, i, e, an, on, in und en bezeichnet, z. B. Vanado-, Vanadi-, Vanade-, Vanadansalze. Bisher hat sich diese Nomenklatur jedoch noch nicht einbürgern können

5. Saure Salze. Saure Salze sind Säuren, in denen nicht alle als H-Ionen in wässeriger Lösung abspaltbaren H-Atome durch Metalle ersetzt sind. Einbasische Säuren können daher keine sauren Salze bilden. Zweibasische Säuren bilden eine Reihe von sauren Salzen, in denen nur 1 H-Atom durch Metalle ersetzt ist, z. B.

$KHSO_4$ — Monokaliumsulfat — Kaliumbisulfat — saures schwefelsaures Kali — doppeltschwefelsaures Kali,

$NaHCO_3$ — Mononatriumkarbonat — Natriumbikarbonat — saures kohlensaures Natron — doppeltkohlensaures Natron,



— Monocalciumkarbonat usw.

Dreibasische Säuren können 2 Reihen von sauren Salzen bilden, je nachdem ob 1 H-Atom oder 2 H-Atome durch Metalle ersetzt werden. Wird nur 1 H-Atom durch Metall ersetzt, so entsteht ein zweifachsaures Salz, in dem also noch 2 vertretbare H-Atome vorhanden sind, z. B.:

KH_2PO_4 — Monokaliumphosphat — zweifachsaures phosphorsaures Kali,

$Ca(H_2PO_4)_2$ — Monocalciumdiphosphat — zweifachsaurer phosphorsaurer Kalk.

Sind 2 H-Atome der Säure durch Metalle ersetzt, so entstehen die einfachsauren Salze, in denen also nur noch 1 vertretbares H-Atom vorhanden ist, z. B.:

Na_2HPO_4 — Dinatriumphosphat — einfachsaures phosphorsaures Natron,

$CaHPO_4$ — Monocalciumphosphat — einfachsaurer phosphorsaurer Kalk.

6. Basische Salze. Basische Salze sind Basen (Metallhydroxyde), in denen nicht alle in wässeriger Lösung als OH-Ionen abspaltbaren Hydroxylgruppen durch Säureradikale ersetzt sind. Einsäurige Basen können daher keine, zweisäurige Basen nur 1 Reihe und dreisäurige Basen 2 Reihen von basischen Salzen bilden, z. B.:

$Zn(OH)NO_3$ — basisches Zinknitrat,

$Al(OH)_2Cl$ — zweifachbasisches Aluminiumchlorid,

$Al(OH)Cl_2$ — einfachbasisches Aluminiumchlorid.

Basische Salze geben leicht Wasser ab und gehen in anhydrische Verbindungen über, z. B.:

$$Bi(OH)_2Cl = BiOCl + H_2O.$$

Der Rest BiO verhält sich in diesem Salze wie ein Metall. Er wird Bismutyl genannt. Das Anhydrid des basischen Wismutchlorids nennt man daher auch Bismutylchlorid und auch alle andern Salze, die entstehen, wenn ein H-tom einer Säure durch den Rest BiO ersetzt ist, Bismutylsalze. Entsprechend bezeichnet man die aus den basischen Antimonsalzen durch Wasserabspaltung entstehenden Salze als Antimonylsalze, z. B. $SbONO_3$ als Antimonylnitrat und die Gruppe SbO als Antimonyl.

7. Hydrate, gemischte und Doppelsalze. Eine große Anzahl Salze zeigt die Eigentümlichkeit, aus wässeriger Lösung je nach der Temperatur entweder wasserfrei oder mit einem oder mehreren Wassermolekülen vereinigt auszukristallisieren. So bildet Eisenchlorid die folgenden Hydrate:

$$FeCl_3.4H_2O,\ FeCl_3.5H_2O,\ FeCl_3.7H_2O \text{ und } FeCl_3.12H_2O.$$

In ähnlicher Weise kristallisiert Calciumchlorid entweder wasserfrei oder mit 1, 2, 4 oder 6 Molekülen Kristallwasser.

Salze, die, wie die bisher beschriebenen,

durch Neutralisation **einer** Säure mit **einer** Base entstehen, nennt man **einfache Salze**. Solche, die durch Neutralisation **einer** Base mit **zwei** Säuren oder **einer** Säure mit **zwei** Basen entstehen, werden als **gemischte Salze** bezeichnet. Solche Salze sind z. B. der Chlorkalk $\mathrm{Ca}\langle^{\mathrm{Cl}}_{\mathrm{OCl}}$, der als ein gemischtes Calciumsalz der Salzsäure und der unterchlorigen Säure aufgefaßt wird, und das Magnesium-Ammonium-Phosphat, $^{\mathrm{Mg}}_{\mathrm{NH_4}}\rangle \mathrm{PO_4}$, das ein gemischtes Magnesium- und Ammoniumsalz der Phosphorsäure ist.

Treten zwei Salze zu einer Verbindung zusammen, wobei entweder die Basen oder die Säuren oder auch beide verschieden sein können, so spricht man von **Doppelsalzen**. Sehr bekannte Doppelsalze sind die Alaune, z. B. der Kaliumaluminiumalaun $K_2SO_4 . Al_2(SO_4)_3 . 24H_2O$, den man durch Aneinanderlagerung von Kaliumsulfat und Aluminiumsulfat entstanden denken kann, der Carnallit $MgCl_2 . KCl . 6H_2O$, der sich durch Aneinanderlagerung von Magnesiumchlorid und Kaliumchlorid bildet, und das **Mohrsche Salz** $(NH_4)_2SO_4 . FeSO_4 . 6H_2O$, das aus Ammoniumsulfat und Eisensulfat besteht. Hydrate, gemischte und Doppelsalze zerfallen in wässerigen Lösungen zum Teil in die einfachen Salze, aus denen sie entstanden sind. Ob aus Lösungen das wasserfreie Salz oder ein Hydrat und, wenn die Lösung mehrere Salze enthält, ob die einzelnen Salze nebeneinander oder als gemischte und Doppelsalze auskristallisieren, hängt von der Löslichkeit der einzelnen Stoffe ab. Dies wird in Abschnitt 14 und 15 näher besprochen.

Bei den Doppelsalzen und Hydraten müssen zur Verkettung der Salzmoleküle untereinander bezw. der Salz- und der Wassermoleküle besondere Affinitätskräfte angenommen werden, die sogenannten **Molekularvalenzen**. Im Gegensatz zu den Atomvalenzen, die die Atome im Molekül aneinanderbinden, verbinden sie die Einzelmoleküle untereinander. Man bezeichnet die Verbindungen dieser Art als **Molekularverbindungen**. Zu diesen Molekularverbindungen gehören auch die Komplexsalze, die im Abschnitt 17 behandelt werden.

8. Elektrolytische Dissoziation. Diejenigen Salze, die durch Vereinigung einer einbasischen Säure mit einer einsäurigen Base gebildet sind, sind in wässeriger Lösung zum Teil in Metallion und Säureion dissoziiert, z. B.

$$NaCl \rightleftarrows Na^{\cdot} + Cl^{\prime}.$$

Man nennt derartige Salze, die in zwei Ionen zerfallen, **binäre Salze**. Salze, bei denen entweder das Metall oder das Säureradikal mehrwertig ist, zeigen eine stufenweise Dissoziation. So dissoziiert z. B. Natriumsulfat primär nach:

$$Na_2SO_4 \rightleftarrows Na^{\cdot} + NaSO_4^{\prime}$$

sekundär nach:

$$NaSO_4^{\prime} \rightleftarrows Na^{\cdot} + SO_4^{\prime\prime};$$

ebenso dissoziiert Bariumchlorid primär nach:

$$BaCl_2 \rightleftarrows BaCl^{\cdot} + Cl^{\prime}$$

und sekundär nach:

$$BaCl^{\cdot} \rightleftarrows Ba^{\cdot\cdot} + Cl^{\prime}.$$

Derartige Salze, die in drei Ionen dissoziieren, nennt man **ternäre Elektrolyte**. Entsprechend nennt man Salze, die in vier Ionenarten zerfallen, **quarternäre Elektrolyte** usw.

Alle Salze sind starke Elektrolyte, unabhängig davon, ob die Säure oder Base, durch deren Neutralisation das Salz entstanden ist, eine starke oder schwache Säure bezw. Base ist. In 1-normaler Lösung sind bei 18° C dissoziiert:

KCl	zu 75,0%	K_2SO_4	zu 53,0%
NH_4Cl	„ 74,0%	Na_2SO_4	„ 44,6%
$NaCl$	„ 67,6%	$ZnSO_4$	„ 24,0%
KNO_3	„ 64,0%	$NaC_2H_3O_2$	„ 52,8%

Die binären Elektrolyte sind im allgemeinen stärker dissoziiert als die ternären und diese wieder stärker als die quarternären usw. Ferner ist stets die primäre Dissoziation erheblich stärker als die sekundäre und diese wieder stärker als die tertiäre usw. So ist z. B. Bleichlorid in 0,04-normaler Lösung primär zu 94,8% dissoziiert nach:

$$PbCl_2 \rightleftarrows PbCl^{\cdot} + Cl^{\prime}$$

sekundär zu 51,1% nach:

$$PbCl^{\cdot} \rightleftarrows Pb^{\cdot\cdot} + Cl^{\prime}.$$

Man vergleiche den Artikel „**Dissociation**“ (elektrolytische Dissociation).

9. Hydrolytische Dissoziation. Außer der elektrolytischen zeigen viele Salze noch eine hydrolytische Dissoziation, die darin besteht, daß das Salz bei seiner Auflösung in Wasser zum Teil in freie Säure und freie Base zerfällt. Dieser Zerfall rührt daher, daß die infolge der elektrolytischen Dissoziation des Wassers vorhandenen $H^{\cdot}$-Ionen mit den Anionen des Salzes zu undissoziierter Säure oder daß die $OH^{\prime}$-Ionen des Wassers mit den Kationen zu undissoziierter Base zusammentreten. Dies kann naturgemäß nur dann eintreten, wenn entweder die Säure oder die Base, aus denen das Salz besteht, oder beide so schwach sind, daß ihre elektrolytische Dissoziation praktisch zu vernachlässigen ist.

Löst man z. B. Cyankalium KCN in Wasser auf, so treten die Cyanionen mit den $H^{\cdot}$-Ionen des Wassers zu undissoziierter Blausäure, die eine sehr schwache Säure ist, zusammen:

$$KCN \rightleftarrows K^{\cdot} + CN'$$
$$H_2O \rightleftarrows H^{\cdot} + OH'$$
$$H^{\cdot} + CN' \rightleftarrows HCN.$$

Die entsprechenden vom Cyankalium herrührenden Kaliumionen und die vom Wasser herrührenden Hydroxylionen bleiben frei in der Lösung, da die Kalilauge eine sehr stark dissoziierte Base ist. So kommt es, daß die wässerige Lösung von Cyankalium alkalisch reagiert.

Man kann daher die hydrolytische Spaltung des Cyankaliums durch die folgenden Gleichungen ausdrücken:

$$KCN + H_2O \rightleftarrows KOH + HCN$$
$$K^{\cdot} + CN' + H_2O \rightleftarrows K^{\cdot} + OH' + HCN$$

Das gleiche findet statt, wenn man ein Salz einer schwachen Base, z. B. Zinkchlorid in Wasser auflöst. Dann reicht die Hydroxylionenkonzentration des Wassers aus, um mit den Zinkionen des Salzes zu der sehr schwachen Base Zinkhydroxyd zusammenzutreten. Die entsprechenden $H^{\cdot}$-Ionen des Wassers und Cl'-Ionen des Zinkchlorids bleiben unverbunden, da Salzsäure eine stark dissoziierte Säure ist. Und so kommt es, daß wässerige Lösungen von Zinkchlorid sauer reagieren. Man kann diesen Vorgang durch die Gleichungen darstellen:

$$ZnCl_2 + 2H_2O \rightleftarrows Zn(OH)_2 + 2HCl$$
$$Zn^{\cdot\cdot} + 2Cl' + 2H_2O \rightleftarrows Zn(OH)_2 + 2H^{\cdot} + 2Cl'.$$

Alle Salze schwacher Säuren oder schwacher Basen sind in wässeriger Lösung hydrolytisch gespalten. Die hydrolytische Spaltung ist um so stärker, je schwächer die Säure und Base ist, aus der das Salz besteht. Je nachdem, ob die Stärke der Säure oder der Base überwiegt, reagiert die wässerige Lösung des Salzes sauer oder alkalisch.

Man beachte, daß die Worte „neutral", „sauer" und „alkalisch" in der anorganischen Chemie in verschiedener Bedeutung gebraucht werden. Sie bezeichnen erstens die chemische Zusammensetzung der Salze (s. Abschnitt 2) und zweitens den Gehalt der Lösung an freien $H^{\cdot}$- oder OH'-Ionen. Neutrale Salze brauchen, infolge hydrolytischer Spaltung, nicht neutral zu reagieren usw. Dies wird durch folgendes Beispiel illustriert:

Na_3PO_4 — neutrales Natriumphosphat — Reaktion: stark alkalisch,
Na_2HPO_4 — einfachsaures Natriumphosphat — Reaktion: schwach alkalisch,
NaH_2PO_4 — zweifachsaures Natriumphosphat — Reaktion: schwach sauer.

Den Grad der hydrolytischen Spaltung einiger Salze bei 25° in 0,1 normaler Lösung zeigt die folgende Tabelle:

Reaktion sauer		Reaktion alkalisch	
$FeCl_3$	10 %	Na_2CO_3	3,17 %
$AlCl_3$	2,0 %	KCN	1,12 %
$Al_2(SO_4)_3$	1,3 %	$Na_2B_4O_7$	0,5 %

Entsprechend der starken Zunahme der Dissoziation des Wassers mit der Temperatur steigt auch die hydrolytische Spaltung der Salze mit der Temperaturerhöhung stark an. Man vergleiche den Artikel „Hydrolyse".

10. Löslichkeit. Das beste und bei weitem gebräuchlichste Lösungsmittel für Salze ist Wasser. Die Löslichkeit der meisten Salze ändert sich stark mit der Temperatur. Zur Darstellung dieser Temperaturabhängigkeit benutzt man meist die graphische Methode. Man trägt in einem Koordinatensystem als Abszisse die Konzentration am besten in der Weise auf, daß man angibt, wieviel g wasserfreies Salz sich in 100 g Wasser auflösen. Als Ordinate wählt man die Temperatur in ° C. Auf diese Weise erhält man ein sogenanntes Löslichkeitsdiagramm. Als Beispiel stellt Figur 1 das Löslichkeitsdiagramm des Kochsalzes dar.

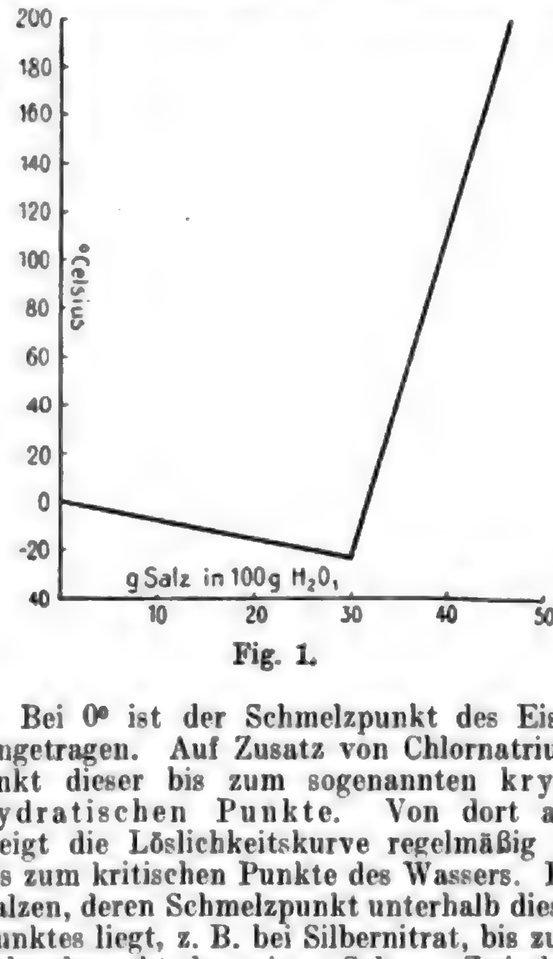


Fig. 1.

Bei 0° ist der Schmelzpunkt des Eises eingetragen. Auf Zusatz von Chlornatrium sinkt dieser bis zum sogenannten kryohydratischen Punkte. Von dort aus steigt die Löslichkeitskurve regelmäßig an bis zum kritischen Punkte des Wassers. Bei Salzen, deren Schmelzpunkt unterhalb dieses Punktes liegt, z. B. bei Silbernitrat, bis zum Schmelzpunkt des reinen Salzes. Zwischen dem Schmelzpunkt des Eises und dem kryohydratischen Punkte befindet sich im Gleichgewicht mit der gesättigten Lösung als Bodenkörper Eis. Im kryohydratischen Punkte ist Eis und Kochsalz nebeneinander mit der gesättigten Lösung im Gleichgewicht, oberhalb desselben befindet sich Kochsalz im Gleichgewicht mit der gesättigten Lösung. Bei allen Temperaturen oberhalb der Löslichkeitskurve ist die Kochsalzlösung ungesättigt. Der Kurvenverlauf gibt die Zu-

sammensetzung der gesättigten Lösung bei allen Temperaturen an. Unterhalb der Löslichkeitskurve sind keine Lösungen mehr beständig. Gelingt es, derartige Lösungen herzustellen, so kann spontan die Uebersättigung ausgelöst werden, wobei entweder Eis oder Kochsalz aus diesen Lösungen auskristallisiert.

Hat man eine Chlornatriumlösung irgendeiner beliebigen Konzentration bei einer beliebigen Temperatur und ändert man entweder die Konzentration bei gleichbleibender Temperatur durch Eindunsten oder die Temperatur bei gleichbleibender Konzentration durch Abkühlen, so wird man stets zu einer gesättigten Lösung kommen. Bei welcher Temperatur bezw. Konzentration dies eintritt, erkennt man, wenn man in dem obigen Koordinatensystem von dem Ausgangspunkte aus entweder zur Abszissen- oder zur Ordinatenachse eine Parallele zieht. Der Schnittpunkt mit der Sättigungskurve gibt die gewünschte Temperatur bezw. Konzentration an. Kühlt man nun die Lösung noch weiter ab oder dunstet sie noch weiter ein, so kristallisiert je nach dem Punkte, an dem die Parallele die Sättigungskurve schneidet, entweder Kochsalz oder Eis aus der Lösung aus. Die Zusammensetzung der Lösung ändert sich nun entsprechend der Sättigungskurve bis zum kryohydratischen Punkt, an dem ein Gemisch von Eis und Kochsalz auskristallisiert. Man vergleiche den Artikel „Phasenlehre".

11. Lösungswärme. Beim Auflösen eines Salzes in einem Lösungsmittel wird eine bestimmte Wärmemenge frei oder gebunden. Die Lösung erwärmt sich also beim Auflösen des Salzes oder sie kühlt sich ab. Unter der Lösungswärme versteht man diejenige Wärmemenge, die beim Auflösen von 1 Mol der Substanz in einer großen Menge des Lösungsmittels entwickelt (+) oder gebunden (—) wird. In der folgenden Tabelle sind die Lösungswärmen einer Anzahl Salze verzeichnet:

Salz	Lösungswärme
Natriumchlorid	— 1180 cal.
Kaliumchlorid	— 4440 „
Natriumbromid	— 190 „
Kaliumsulfat	— 6380 „
Quecksilberchlorid	— 3300 „
Natriumacetat	+ 4200 „
Chlorsilber	— 15800 „
Bromsilber	— 20200 „
Jodsilber	— 26600 „

Im allgemeinen, besonders beim Vergleich schwer löslicher und chemisch analoger Stoffe, findet man die Präzipitationswärme (= negativer Wert der Lösungswärme) um so größer, je schwererlöslich die Substanz ist.

Zieht man von der Gesamtlösungswärme diejenige Wärmemenge ab, die bei der Verdünnung der gesättigten Lösung eines Salzes bis zur ideal verdünnten Lösung frei wird, die Verdünnungswärme, so erhält man die Lösungswärme, die beim Auflösen eines Salzes in der zur Herstellung seiner gesättigten Lösung notwendigen Menge des Lösungsmittels entwickelt wird, die man als totale oder integrale Lösungswärme bezeichnet.

Zwischen dieser integralen Lösungswärme und der Aenderung der Löslichkeit mit der Temperatur besteht eine einfache thermodynamische Beziehung, so daß man die eine Größe aus der anderen berechnen kann. Es ist die integrale Lösungswärme Q

$$Q = -RT^2 \frac{d \ln c}{d T},$$

worin R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur und c die Löslichkeit bezeichnet. Durch Integration dieser Gleichung erhält man die Beziehung

$$\ln c_1 - \ln c_2 = \frac{Q}{2R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right),$$

aus der man die integrale Lösungswärme aus den Löslichkeiten c_1 und c_2 bei den Temperaturen T_1 und T_2 berechnen kann.

Die Löslichkeit derjenigen Stoffe, deren integrale Lösungswärme negativ ist, nimmt also mit der Temperatur zu, die derjenigen, deren integrale Lösungswärme positiv ist, mit der Temperatur ab. Man vergleiche den Artikel „Thermochemie".

12. Löslichkeitsprodukt. Wendet man das Massenwirkungsgesetz auf eine gesättigte Kochsalzlösung an, und nennt in dieser die Konzentration der Na-Ionen c_1, die der Cl-Ionen c_2, die des undissoziierten Chlornatriums c_3 und die Dissoziationskonstante K, so folgt:

$$Na^{\cdot} + Cl' = NaCl$$
$$c_1 c_2 = K c_3 = L.$$

Die Größe L, die gleich dem Produkte der Ionenkonzentrationen der gesättigten Lösung ist, nennt man das Löslichkeitsprodukt. In einer gesättigten NaCl-Lösung hat also zwar bei gleicher Temperatur das undissoziierte Chlornatrium immer die gleiche Konzentration, das Natriumion und Chlorion aber kann sehr verschiedene Konzentrationen haben. Nur ihr Produkt hat, wie die obige Gleichung lehrt, stets einen bestimmten Wert, es ist nämlich gleich dem Produkt der Konzentration des undissoziierten Kochsalzes und der Dissoziationskonstante. In einer gesättigten Natriumchloridlösung, in der kein anderes Natriumsalz und kein anderes Chlorid enthalten ist, ist naturgemäß die $Na^{\cdot}$-Konzentration und Cl'-Konzentration gleich. Aber auch bei kleiner $Na^{\cdot}$-Konzentration

kann eine Natriumchloridlösung gesättigt sein, wenn nur die Cl′-Konzentration sehr groß ist, und bei kleiner Cl′-Konzentration immer dann, wenn die Na·-Konzentration groß ist. So kann man eine gesättigte Natriumchloridlösung mit geringer Na·-Konzentration dadurch herstellen, daß man Salzsäuregas in eine verdünnte Lösung eines Natriumsalzes leitet und eine solche mit geringer Cl′-Konzentration dadurch, daß man zu der Lösung eines Chlorides konzentrierte Natronlauge gießt.

13. **Löslichkeitsbeeinflussung.** Ebenso folgt aus der Lehre vom Löslichkeitsprodukt, wie man die Löslichkeit eines Salzes beeinflussen kann. Fügt man zu einer gesättigten Chlornatriumlösung eine konzentrierte Lösung eines Chlorides oder konzentrierte Salzsäure hinzu, so wird hierdurch die Cl′-Konzentration erhöht und dadurch das Löslichkeitsprodukt überschritten. Die Lösung wird also übersättigt. Ein Teil des Na· tritt mit dem Cl′ zu undissoziiertem NaCl zusammen und dieses kristallisiert aus der Lösung aus. Ebenso wird, wenn man zu einer gesättigten Natriumchloridlösung eine konzentrierte Lösung irgendeines anderen Natriumsalzes oder Natronlauge hinzugibt, das Löslichkeitsprodukt überschritten, also Natriumchlorid ausgefällt. Ganz allgemein: Fügt man zur gesättigten Lösung irgendeines Elektrolyten einen gleichionigen Elektrolyten hinzu, so wird dadurch seine Löslichkeit vermindert.

In einigen wenigen Fällen entsteht beim Hinzufügen eines gleichionigen Elektrolyten keine Löslichkeitserniedrigung sondern eine Löslichkeitserhöhung. In diesen Fällen findet eine Bildung von komplexen Salzen (s. Abschnitt 17) statt. Diese anomale Löslichkeitsbeeinflussung kann daher als Erkennungszeichen für die Bildung von Komplexsalzen in Lösungen benutzt werden. Man vergleiche den Artikel „Dissoziation" (elektrolytische Dissoziation).

14. **Gleichgewicht von Anhydrid und Hydraten.** Die Gleichgewichtsverhältnisse zwischen dem Anhydrid und den verschiedenen Hydraten eines Salzes übersieht man am besten, wenn man das Löslichkeitsdiagramm der betreffenden Salzart aufzeichnet. Hierbei wählt man praktisch wiederum die Temperatur als Ordinate und als Abszisse die Anzahl Moleküle Wasser, die in der gesättigten Lösung auf je ein Molekül wasserfreies Salz vorhanden sind. Als Beispiel für ein derartiges Löslichkeitsdiagramm ist im folgenden das des Calciumchlorids gezeichnet.

Der Kurvenverlauf zeigt zwei Maximumpunkte, die den Schmelzpunkten der reinen Hydrate entsprechen. Sie werden auch kongruente Schmelzpunkte genannt. An diesen Punkten hat die Lösung und die sich ausscheidende Kristallart die gleiche Zusammensetzung. Sowohl durch Zusatz von Wasser wie durch Zusatz von wasserfreiem Salz tritt eine Schmelzpunkterniedrigung ein. Daher fallen die Löslichkeitskurven vom Scheitelpunkte nach beiden Seiten ab. Die tiefsten Stellen sind die Schnittpunkte der Löslichkeitskurven zweier Hydrate, in denen beide Hydrate nebeneinander und mit der Lösung im Gleichgewicht stehen. Sie stellen die kryohydratischen Punkte zweier Hydrate dar.

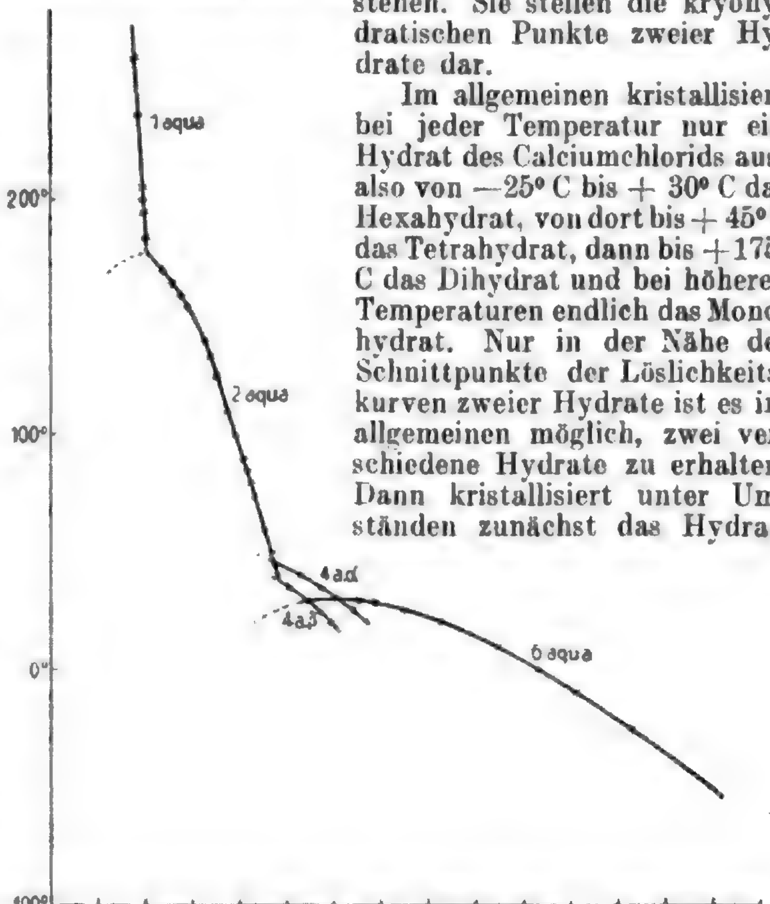


Fig. 2.

Im allgemeinen kristallisiert bei jeder Temperatur nur ein Hydrat des Calciumchlorids aus, also von —25° C bis + 30° C das Hexahydrat, von dort bis + 45° C das Tetrahydrat, dann bis + 175° C das Dihydrat und bei höheren Temperaturen endlich das Monohydrat. Nur in der Nähe der Schnittpunkte der Löslichkeitskurven zweier Hydrate ist es im allgemeinen möglich, zwei verschiedene Hydrate zu erhalten. Dann kristallisiert unter Umständen zunächst das Hydrat, welches die größere Löslichkeit hat, das also bei der betreffenden Temperatur eigentlich unbeständig ist, aus und dieses geht bisweilen von selbst, jedenfalls aber nach Impfen der Lösung mit den Kristallen des bei der Temperatur beständigen Hydrates, allmählich in dieses über.

Dasjenige Hydrat, welches bei einer Temperatur beständig ist, zeigt auch den ge-

ringeren Partialdruck des Wassers. Bei denjenigen Temperaturen, bei denen sich die Löslichkeitskurven zweier Hydrate schneiden, bei denen also zwei Hydrate nebeneinander beständig sind, haben diese auch die gleichen Wassertensionen. Das Tetrahydrat des Calciumchlorids ist in zwei allotropen Modifikationen einer α- und einer β-Form bekannt. Die α-Form ist bei allen Temperaturen unlöslicher als die β-Form. Sie stellt daher ein stabiles, die β-Form aber ein instabiles Hydrat dar. Ueber weitere Einzelheiten dieser Löslichkeitsdiagramme vgl. den Artikel „Phasenlehre".

15. **Doppelsalzbildung.** Ob ein Doppelsalz oder die Mischung der Komponenten, aus denen sich das Doppelsalz zusammensetzt, bei einer Temperatur beständig ist, hängt ebenfalls von den Löslichkeitsverhältnissen ab. Als Beispiel diene der einfachste und bei Doppelsalzen weitaus häufigste Fall, daß nämlich beide Komponenten eine Ionenart gemeinsam haben und daß sie sich nur zu einem Doppelsalz und zwar durch Aneinanderlagerung von je 1 Molekül der Komponenten vereinigen. Wir nennen die Komponenten A und B und das Doppelsalz AB.

Zur graphischen Darstellung der Löslichkeit eines Salzgemisches bei einer bestimmten Temperatur trägt man am besten die Konzentration einer gesättigten Lösung an einer Komponente A als Ordinate, die der anderen Komponente B als Abszisse auf. Man erhält dann das folgende Schema:

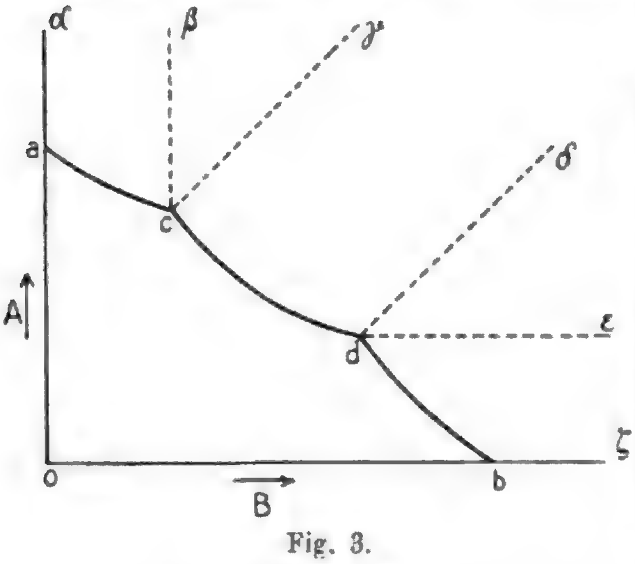


Fig. 3.

a und b geben die Sättigungspunkte an A und B wieder, wenn die Lösung nur die eine der beiden Komponenten enthält. Auf Zusatz der anderen Komponente nimmt die Löslichkeit ab. Dies ist durch die Kurvenstücke ac und bd wiedergegeben. Bei den Punkten c und d ist die Lösung gleichzeitig mit Doppelsalz und mit der einen der beiden Komponenten gesättigt. Das gesamte Feld teilt sich also in folgende Gebiete. Innerhalb des Flächenstückes acdb ist die Lösung ungesättigt, in dem Gebiet $\alpha ac\beta$ ist sie an der Komponente A übersättigt, im Gebiete $\beta c\gamma$ ist sie gleichzeitig an A und dem Doppelsalz übersättigt, im Gebiete $\gamma cd\delta$ ist sie an Doppelsalz übersättigt, im Gebiete $\delta d\varepsilon$ liegt Uebersättigung an der Komponente B und dem Doppelsalz vor und in dem Flächenstück $\varepsilon db\zeta$ endlich ist die Lösung an der Komponente B übersättigt. Je nachdem, wie nun die Löslichkeitskurve des Doppelsalzes im Verhältnis zu der der beiden Komponenten verläuft, ist entweder das Doppelsalz bei einer bestimmten Temperatur überhaupt nicht stabil (Fig. 4)

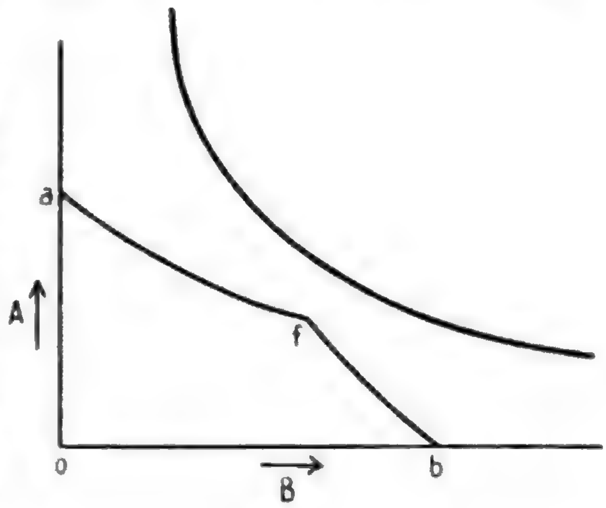


Fig. 4.

oder aber es bildet sich innerhalb eines sehr großen Konzentrationsbereiches aus (Fig. 5).

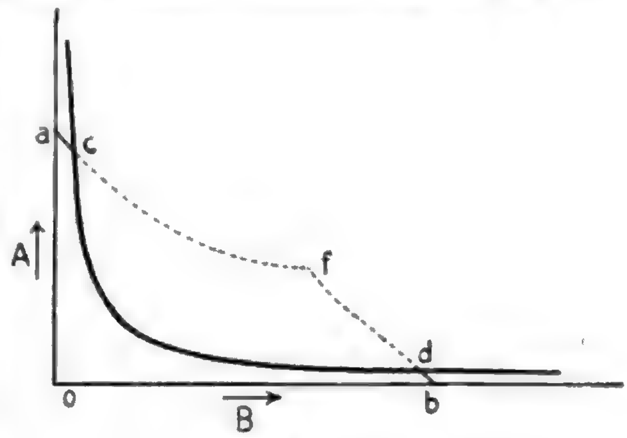


Fig. 5.

Trägt man in diesen Diagrammen als dritte Koordinate die Temperatur auf, so erhält man, wie man sich leicht vorstellen kann, Raumfiguren, welche die Löslichkeit eines Salzpaares und des sich aus ihm bildenden Doppelsalzes über das ganze Temperaturintervall wiedergeben. Das gleiche wie für

die Bildung von Doppelsalzen gilt auch für die von gemischten Salzen.

16. **Ausscheidungsfolge und doppelte Umsetzung.** Noch komplizierter liegen die Verhältnisse, wenn eine Lösung zwei nicht gleichionige Salze nebeneinander enthält. Enthält eine Lösung z. B. Natriumnitrat und Kaliumchlorid, so stellt sich folgendes Gleichgewicht ein:

$$NaNO_3 + KCl \rightleftharpoons NaCl + KNO_3.$$

Es können sich also aus der Lösung zwei verschiedene Salzpaare ausscheiden, entweder Natriumnitrat und Kaliumchlorid oder Natriumchlorid und Kaliumnitrat, ganz gleichgültig, welches von beiden Salzpaaren man ursprünglich in Lösung gebracht hat. Derartige Salzpaare nennt man „reziproke Salzpaare". Beim Eindunsten einer derartigen Lösung scheidet sich bei jeder Temperatur zunächst derjenige Stoff aus, an dem zunächst Sättigung eintritt. Welches der beiden Salzpaare sich bei einer bestimmten Temperatur ausscheidet, erkennt man also am besten, wenn man die Löslichkeit aller vier Salze in ein Koordinatensystem einträgt, wie es in Figur 6 geschehen ist.

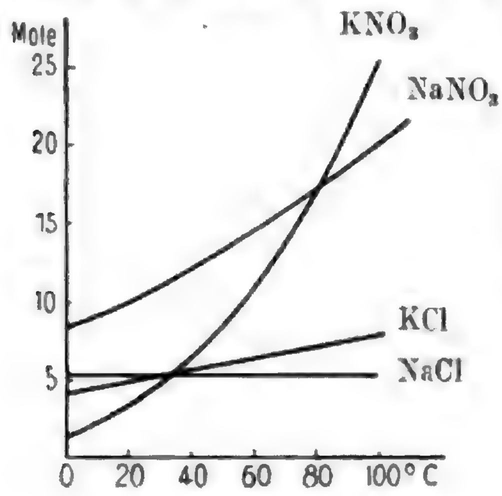


Fig. 6.

Bei tiefer Temperatur (0° bis 32°) kristallisiert zunächst Kaliumnitrat, bei höherer Temperatur (32° bis 100°) zunächst Natriumchlorid aus. Hierauf beruht die sogenannte Inversion des Salpeters, die Darstellung von Kaliumnitrat.

Bei diesem Beispiel erhält man also bei allen Temperaturen, gleichgültig von welchem der beiden Salzpaare man ausgeht, immer Natriumchlorid und Kaliumnitrat. Kaliumchlorid und Natriumnitrat kann man durch fraktionierte Kristallisation aus wässeriger Lösung des reziproken Salzpaares also nie erhalten. In anderen Fällen liegen die Löslichkeitsverhältnisse derart, daß unterhalb einer bestimmten Temperatur ein Salz des einen Salzpaares, oberhalb dieser aber ein Salz des anderen Salzpaares die geringste Löslichkeit zeigt. Dann kann man durch fraktionierte Kristallisation unterhalb dieser Temperatur das eine und oberhalb dieser Temperatur das andere Salzpaar erhalten. Man nennt dann diese Temperatur eine „Umwandlungstemperatur".

Analog liegen die Verhältnisse immer, wenn man zu einer Lösung irgendeines beliebigen Salzes irgendein anderes Salz hinzugibt. Es scheidet sich stets zunächst das unlöslichste von den vier Salzen aus, die durch Kombination der beiden Anionen und Kationen der beiden Salze entstehen können. Bringt man z. B. Natriumchlorid und Silbernitrat in eine Lösung zusammen, so bildet sich das unlösliche Silberchlorid:

$$NaCl + AgNO_3 = \mathbf{AgCl} + NaNO_3.$$

Man nennt diesen Vorgang doppelte Umsetzung. Da sich bei diesen doppelten Umsetzungen nur die beiden Ionenarten, welche zusammen das unlösliche Salz geben, miteinander vereinigen, die anderen Ionenarten aber, besonders in verdünnten Lösungen, zum größten Teil unverändert weiter nebeneinander vorhanden sind, so schreibt man diese doppelten Umsetzungen am besten als Ionenreaktionen, so z. B. die obige Reaktion:

$$Ag^{\cdot} + Cl' = AgCl.$$

17. **Komplexsalze.** 17a) Begriff und Bildungsweise. Ein Teil derjenigen Salze, die man früher als Hydrate oder Doppelsalze aufgefaßt hatte, bezeichnet man heute, da sie in vielen Punkten ein von diesen abweichendes chemisches Verhalten zeigen, als Komplexsalze. So faßte man z. B. das gelbe Blutlaugensalz früher als ein Doppelsalz von Cyankalium und Eisencyanid auf: $4KCN.Fe(CN)_2$, schreibt diesem Salze aber jetzt die Formel $K_4[Fe(CN)_6]$ zu. Der Unterschied in der Auffassung besteht im folgenden: Wäre das Blutlaugensalz ein Doppelsalz, so sollte seine wässerige Lösung infolge der elektrolytischen Dissoziation der beiden Einzelsalze nebeneinander $K^{\cdot}$-, $Fe^{\cdot\cdot}$-, und CN'-Ionen enthalten. In Wirklichkeit enthält die wässerige Lösung aber nur zwei Ionenarten, nämlich $K^{\cdot}$- und $[Fe(CN)_6]''''$-Ionen. Derartige Ionen, die durch Aneinanderlagerung von zwei Einzelionen ($Fe^{\cdot\cdot}$ und CN') entstanden sind, nennt man komplexe Ionen und die Salze, die komplexe Ionen enthalten, Komplexsalze. Die einfachen Salze werden zum Unterschiede von diesen oft typische Salze und die einfachen Metallionen typische Ionen genannt. Zur Unterscheidung von den typischen Ionen und zur Bezeichnung ihrer besonderen chemischen Eigenschaften schließt man die komplexen Ionen in der

Regel, wie es oben schon geschehen ist, in eckige Klammern ein.

Zum Typus der Komplexsalze, die durch Aneinanderlagerung zweier Salze entstanden sind, gehören außer den Doppelcyaniden, wie das oben genannte Kaliumferrocyanid, Kaliumsilbercyanid $K[Ag(CN)_2]$ usw., auch die Doppelrhodanide, z. B. Kaliumquecksilberrhodanid $K_2[Hg(SCN)_4]$, die Doppelhalogenide, z. B. Kaliumplatinchlorid $K_2[PtCl_6]$ und Kaliumgoldchlorid $K[AuCl_4]$, und ähnliche Salze.

In allen diesen Fällen besteht das Komplexion aus einem Metallion, das man das Zentralion nennt, an das mehrere negative Ionen angelagert sind. Die elektrische Ladung des komplexen Ions ist in diesem Falle gleich der Summe der elektrischen Ladungen der Ionen, aus denen es sich zusammensetzt, z. B.

$$[Fe(CN)_6]'''' = Fe^{\cdot\cdot} + 6CN' = 2(+) + 6(-) = 4(-)$$
$$[Hg(SCN)_4]'' = Hg^{\cdot\cdot} + 4SCN' = 2(+) + 4(-) = 2(-)$$
$$[AuCl_4]' = Au^{\cdot\cdot\cdot} + 4Cl' = 3(+) + 4(-) = 1(-)$$

Außer durch Aneinanderlagerung von zwei Salzen können komplexe Salze auch durch Anlagerung von Ammoniak an Salze entstehen. So wird beispielsweise das Kupferammoniakchlorid $[Cu(NH_3)_4]SO_4$ durch Anlagerung von Ammoniak an Kupfersulfat gebildet. An Stelle von Ammoniak können auch Ammoniaksubstitutionsprodukte eintreten. So kann an die Stelle von 1 Mol. Ammoniak 1 Mol. Methylamin CH_3NH_2 oder Pyridin C_5H_5N und an Stelle von 2 Mol. Ammoniak 1 Mol. Aethylendiamin $C_2H_4(NH_2)_2$ oder Dipyridin $C_{10}H_{10}N_2$ treten. Für diese häufig gebrauchten Verbindungen wendet man beim Schreiben der Formeln der Komplexsalze die folgenden Abkürzungen an: Pyridin = py, Dipyridin = dipy, Aethylendiamin = en.

Ferner kann an Stelle von Ammoniak Wasser oder Säureanhydrid angelagert werden. Dies ist z. B. der Fall im Hexaquochromichlorid $[Cr(H_2O)_6]Cl_3$, einem komplexen Salz, das durch Anlagerung von Wasser an Chromchlorid gebildet ist, und im Ammoniumphosphormolybdat $(NH_4)_3[PO_4(MoO_3)_{12}]$, einem komplexen Salz, bei dem Molybdänsäureanhydrid an Ammoniumphosphat angelagert ist.

Für Molybdänsäureanhydrid kann auch irgendein anderes Säureanhydrid angelagert werden, z. B. Wolframsäureanhydrid, wie im Natriumphosphorwolframat $Na_3[PO_4(WO_3)_{12}]$. Hierbei wie auch bei den durch Ammoniak- oder Wasseranlagerung gebildeten Komplexsalzen enthalten die komplexen Ionen außer dem Zentralion nur Neutralteile. Infolgedessen ist in allen diesen Fällen die elektrische Ladung des komplexen Ions gleich der des typischen Ions, aus dem es entstanden ist.

17b) Nachweis. Daß in diesen komplexen Salzen nicht die einfachen Metallionen, sondern dafür komplexe Ionen vorhanden sind, kann man zum Teil durch das Ausbleiben der für die einfachen Metallionen charakteristischen Reaktionen, zum Teil durch das Auftreten von Reaktionen beweisen, die die einfachen Metallionen nicht geben, die daher den komplexen Ionen zugeschrieben werden müssen. So gibt Ferricyankalium ($K_3[Fe(CN)_6]$) mit Schwefelammonium keinen schwarzen Niederschlag (Fe_2S_3), während alle normalen Eisensalze diese Reaktion zeigen, und wird dafür leicht zum entsprechenden Ferrosalz ($K_4[Fe(CN)_6]$) reduziert, eine Reaktion, die typische Ferrisalze nicht zeigen. Auch durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Ueberführung durch den elektrischen Strom kann man in vielen Fällen die Komplexsalzbildung nachweisen. So müßte, wenn Ammoniak und Kupfersulfat in wässeriger Lösung unverbunden neben einander beständen, die elektrische Leitfähigkeit der Lösung gleich der Summe der Leitfähigkeiten der beiden Elektrolyte sein. Durch die Komplexsalzbildung aber wird infolge der Verkleinerung der Zahl der Ionen die Leitfähigkeit verringert. Im gelben Blutlaugensalz würde, wenn es ein Doppelsalz wäre, das $Fe^{\cdot\cdot}$-Ion bei der Elektrolyse zur Kathode überführt werden, das komplexe Anion $[Fe(CN)_6]''''$ aber wandert zur Anode. Bisweilen kann man auch, wie im Abschnitt 13 erwähnt wurde, aus der Löslichkeitszunahme auf Komplexsalzbildung schließen. Und endlich kann man bei gefärbten Salzen die Komplexsalzbildung oft schon an der Farbenänderung erkennen. So sind z. B. alle normalen Ferrosalze in wässeriger Lösung schwach bläulich grün gefärbt, das Kaliumferrocyanid aber ist gelb, alle normalen Kupfersalze sind in verdünnter wässeriger Lösung hellblau, das Kupferammoniaksulfat aber ist dunkelviolett gefärbt.

17c) Beständigkeit. Wenn auch bei der elektrolytischen Dissoziation der komplexen Salze vorwiegend komplexe Ionen entstehen, z. B.

$$K_4[Fe(CN)_6] = 4K^{\cdot} + [Fe(CN)_6]''''$$
$$[Cu(NH_3)_4]SO_4 = [Cu(N_3)H_4]^{\cdot\cdot} + SO_4''$$
$$[Cr(H_2O)_6]Cl_3 = [Cr(H_2O)_6]^{\cdot\cdot\cdot} + 3Cl'$$
$$(NH_4)_3[PO_4(MoO_3)_{12}] = 3NH_4^{\cdot} + [PO_4(MoO_3)_{12}]''',$$

so sind doch die komplexen Ionen, wenn auch nur zu einem sehr geringen Grade, auch ihrerseits weiter dissoziiert, z. B.

$[Fe(CN)_6]'''' = Fe^{\cdot\cdot} + 6CN'$
$[Cu(NH_3)_4]^{\cdot\cdot} = Cu^{\cdot\cdot} + 4NH_3$
$[Cr(H_2O)_6]^{\cdot\cdot\cdot} = Cr^{\cdot\cdot\cdot} + 6H_2O$
$[PO_4(MoO_3)_{12}]''' = PO_4''' + 12MoO_3$

Der im Anfang erwähnte Unterschied zwischen Doppelsalzen und Komplexsalzen ist also nicht prinzipieller, sondern nur gradueller Natur. Je nach dem Grade der Dissoziation des Komplexions in die Einzelionen gibt es Uebergänge zwischen Komplex- und Doppelsalzen. Man spricht daher von dem Grade der Komplexbildung und unterscheidet zwischen wenig dissoziierten, stark komplexen und stark dissoziierten, schwach komplexen Ionen. Die Größe der Massenwirkungskonstanten der Dissoziationsgleichung eines Komplexions liefert also ein Maß für die Beständigkeit des Komplexions. Eine Anzahl derartiger Beständigkeitskonstanten sind der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Formel der komplexen Ionen	Beständigkeitskonstante
$[Zn(C_2O_4)_2]''$	$1{,}9.10^8$
$[Zn(CN)_4]''$	$5{,}7.10^6$
$[Ag(SCN)_4]'''$	$1{,}5.10^{11}$
$[Ag(S_2O_3)_2]'''$	$9{,}8.10^{12}$
$[AgJ_4]'''$	$7{,}7.10^{13}$
$[Hg(CN)_4]''$	$5{,}0.10^{20}$
$[Ag(CN)_2]'$	$1{,}1.10^{21}$
$[Cu(CN)_4]'''$	$5{,}6.10^{26}$
$[Au(CN)_2]'$	$>2{,}5.10^{29}$

Die Neigung der Ionen, mit anderen Ionen oder Neutralteilen zu komplexen Ionen zusammenzutreten wächst im allgemeinen mit abnehmender Elektroaffinität (vgl. den Artikel „Dissoziation, elektrolytische Dissoziation"). So zeigen die Edelmetalle, die die geringste Elektroaffinität besitzen, die größte Neigung Komplexionen zu bilden und die Beständigkeitskonstante dieser Komplexionen ist sehr groß. Komplexsalze der unedelsten Metalle, der Alkalien, aber sind bisher nicht bekannt. Von den Ionen mittlerer Elektroaffinität zeichnen sich besonders Chrom und Kobalt durch ihre Neigung zur Komplexsalzbildung aus.

17d) Bezeichnung. Die höchste Zahl von Molekülen (Ionen plus Neutralteile), welche das komplexbildende Ion (Zentralion) im Komplex zu binden vermag, nennt man seine Koordinationszahl. Bei den meisten komplexen Ionen beträgt die Koordinationszahl 6, so besonders bei $Zn^{\cdot\cdot}$, $Fe^{\cdot\cdot}$, $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$, $Cr^{\cdot\cdot\cdot}$, $Co^{\cdot\cdot\cdot}$, $Ni^{\cdot\cdot}$, $Bi^{\cdot\cdot\cdot}$, $Cd^{\cdot\cdot}$, $Sn^{\cdot\cdot}$, $Sb^{\cdot\cdot\cdot}$ und $Pt^{\cdot\cdot\cdot\cdot}$. Daneben findet sich die Koordinationszahl 4, wie z. B. bei $Cu^{\cdot\cdot}$, $Cu^{\cdot}$, $Ag^{\cdot}$ und $Pt^{\cdot\cdot}$.

Sind alle 4 bezw. 6 Koordinationsstellen entweder durch Ionen oder durch Neutralteile besetzt, so nennt man das betreffende Salz koordinativ gesättigt, da dann die höchste Anzahl Gruppen an das Zentralion gebunden ist, die überhaupt gebunden werden kann. So sind z. B. bei den Verbindungen $[Co(NH_3)_6]Cl_3$ und $K_3[Co(NO_2)_6]$ an das Kobaltion im ganzen neun Gruppen gebunden. Von diesen nennt man die 6, die sich im Komplex befinden, koordinativ-, die drei anderen, die außerhalb stehen, ionogen gebunden.

Man kann in diesen Komplexsalzen der Reihe nach je einen Neutralteil durch ein Ion ersetzen und umgekehrt, in den oben genannten Salzen also je $1\,NH_3$ durch $1\,NO_2'$ oder $1\,NO_2'$ durch $1\,NH_3$. Dadurch erhält man ganze Reihen von Komplexsalzen. Eine derartige Reihe sei im folgenden zugleich als Beispiel für die Nomenklatur der Komplexsalze angeführt. Bis auf das vorletzte sind alle Glieder dieser Reihe in reiner Form dargestellt:

Hexammin-kobaltichlorid
(Luteo-kobaltchlorid) $[Co(NH_3)_6]Cl_3$,
Mononitrito-pentammin-kobaltichlorid
(Xanthokobaltchlorid) $[Co(NH_3)_5NO_2]Cl_2$,
Dinitrito-tetrammin-kobaltichlorid
(Croceokobaltchlorid) $[Co(NH_3)_4(NO_2)_2]Cl$,
Tinitrito-triammin-kobaltiat
$[Co(NH_3)_3(NO_2)_3]$,
Kalium-tetranitrito-diammin-kobaltiat
(Erdmannsches Salz) $K[Co(NH_3)_2(NO_2)_4]$,
Kalium-pentanitrito-monammin-kobaltiat
(unbekannt) $K_2[CoNH_3(NO_2)_5]$,
Kalium-hexanitrito-kobaltiat $K_3[Co(NO_2)_6]$.

Die in Klammern hinzugefügte Bezeichnung gibt die alte Nomenklatur. Die Endglieder dieser Reihe, die koordinativ gesättigt sind, enthalten, wie schon erwähnt, im ganzen 9 Gruppen an das Zentralion gebunden, die mittleren Glieder, die koordinativ ungesättigt sind, nur 6 bis 8 Gruppen. Ebenso wie vom Kobalt bilden sich derartige Amminsalze der entsprechenden Zusammensetzung auch von allen anderen komplexsalzbildenden Metallionen. Und zwar sind eine große Anzahl derartiger Salze bekannt, da jede der Ionenarten, z. B. die $K^{\cdot}$, Cl', und NO_2'-Ionen in den oben angeführten Salzen, durch jede beliebige andere Ionenart der gleichen Wertigkeit ersetzt sein kann.

An Stelle von zwei 1-wertigen Ionen kann auch ein 2-wertiges Ion treten usw.

In den ersten drei Salzen der obigen Reihe ist das Kobaltkomplexion Kation, in den letzten drei Salzen Anion, das mittelste, das Trinitrito-triammin-kobaltiat, ist ein Nichtleiter der Elektrizität, bildet also weder Anionen noch Kationen.

Indem für je 1 Mol. NH_3 in diesen Komplexsalzen 1 Mol. H_2O eintreten kann, wird ein ständiger Uebergang von den Metallammoniaken zu den Metallhydraten gebildet

Als Beispiel hierfür und gleichzeitig als Beispiel für die Nomenklatur seien im folgenden die Uebergangsverbindungen vom Chromi-hexammin-chlorid zum Chromi-hexahydrochlorid angeführt, von denen alle bis auf das vorletzte Glied isoliert sind.

Hexammin-chromichlorid
(Praseo-chromchlorid) $[Cr(NH_3)_6]Cl_3$,
Monaquo-pentammin-chromichlorid
(Roseochromchlorid) $[Cr(NH_3)_5H_2O]Cl_3$,
Diaquo-tetrammin-chromichlorid
$[Cr(NH_3)_4(H_2O)_2]Cl_3$,
Triaquo-triammin-chromichlorid
$[Cr(NH_3)_3(H_2O)_3]Cl_3$,
Tetraquo-diammin-chromichlorid
$[Cr(NH_3)_2(H_2O)_4]Cl_3$,
Pentaquo-monammin-chromichlorid
(unbekannt) $[CrNH_3(H_2O)_5]Cl_3$,
Hexaquo-chromichlorid
(violettes Chromchlorid) $[Cr(H_2O)_6]Cl_3$.

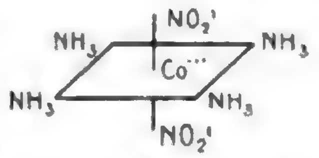
Das letzte Glied dieser Reihe wurde früher als kristallwasserhaltiges Chromchlorid bezeichnet. Man sieht hieraus wieder, daß ein prinzipieller Unterschied zwischen kristallwasserhaltigen und komplexen Salzen nicht besteht.

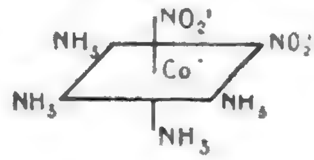
Im allgemeinen sind in diesen Komplexsalzen die Neutralteile fester an das Zentralion gebunden als die Ionen, so daß man durch doppelte Umsetzung in einer beliebigen Reihe, z. B. bei den Chromi-triammin-triaquosalzen aus dem Chlorid das Nitrat, aus diesem das Sulfat usw. darstellen kann, ohne daß die Zahl der Wasser- und Ammoniakgruppen des Komplexes dabei geändert wird. Auch zeigen alle Salze vom gleichen Typ, die also die gleiche Anzahl Wasser und Ammoniakmoleküle enthalten, unabhängig von der Natur des Zentralions und der im Komplex enthaltenen Ionen die gleiche Farbe. So sind z. B. die Hexamminsalze von Chrom und Kobalt gelb und die Hexaquosalze beider Metalle blau gefärbt.

17e) Struktur- und Spiegelbildisomerie. Die Eigentümlichkeit, daß die Koordinationszahl der meisten Komplexbildner 6, die von vielen anderen 4 ist, erklärt man aus räumlichen Gründen. Man nimmt an, daß bei Stoffen mit der Koordinationszahl 6 das Zentralion sich in der Mitte eines regulären Oktaeders befindet, und daß die 6 koordinativen Bindungen von diesem aus nach den 6 Ecken des Oktaeders gehen.

Bei Stoffen mit der Koordinationszahl 4 denkt man in ähnlicher Weise das Zentralion in der Mitte eines Tetraeders sitzend und die 4 koordinativen Bindungen nach den 4 Ecken des Tetraeders gehend.

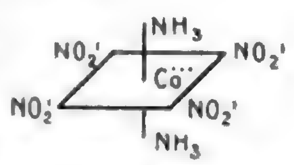
Durch diese spezielle Annahme über den räumlichen Bau der komplexen Salze kommt man zur Erklärung der Struktur- und Spiegelbildisomerieerscheinungen. Strukturisomerie weisen alle Diamminsalze, Triammin- und Tetramminsalze auf. Doch sind bisher nur die Isomerieverhältnisse bei Diammin- und Tetramminsalzen näher untersucht worden. Den komplexen Ionen der beiden stereoisomeren Tetramminsalze entsprechen die beiden folgenden Strukturformeln. Die Oktaederform ist dabei durch Auszeichnung der Berührungskante der beiden vierseitigen Pyramiden und der die Spitzen der beiden Pyramiden verbindenden Achse kenntlich gemacht. Man erhält also aus dem Formelbild ein perspektivisches Bild des Oktaeders, wenn man die Endpunkte der Achsen mit den Ecken des Rhombus verbindet.

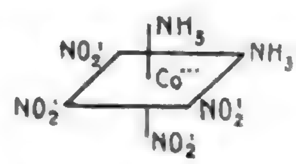




Diese Isomerie findet sich bei allen Kobaltkomplexen, gleichgültig welche Ionen (Cl', NO_3', NO_2', SO_3'', SO_4'', Br', J', OH', C_2O_4'', SCN', S_2O_3'') und welche Neutralteile (NH_3, H_2O, py, en) als Komplexbildner fungieren, wieder. Und ebenso wie bei Kobaltsalzen sind diese Isomerieerscheinungen bei anderen Salzen mit der Koordinationszahl 6, z. B. Chromsalzen, beobachtet worden. Und zwar sind die Cissalze rotgelb bis violett gefärbt und wurden dieser Färbung wegen früher als Flavo- und Violeosalze bezeichnet, die Transsalze dagegen sind alle blau-grün bis violett gefärbt und wurden daher früher Croceo- und Praseosalze genannt.

Ganz analog sind auch die Isomerieerscheinungen der Diammine, nur daß hier Ionen und Neutralteile im Komplex die Plätze getauscht haben. Man kann daher für die komplexen Anionen der beiden isomeren Diamminsalze die folgenden Raumformeln aufstellen:





Optische Aktivität, d. h. die Eigentümlichkeit, daß Lösungen des Stoffes die Ebene des polarisierten Lichtes drehen, zeigen diejenigen chemischen Verbindungen, die in zwei enantiomorphen Formen vorkommen können, deren räumliche Strukturformeln sich also wie Gegenstand zu Spiegelbild verhalten. Eine derartige Enantiomorphie zeigen z. B. die Triäthylendiaminkobaltisalze. Da jede koordinativ 2-wertige Aethylendiamingruppe zwei Ecken des Komplexsalzoktaeders besetzt, so sind die beiden folgenden Raumformeln möglich:

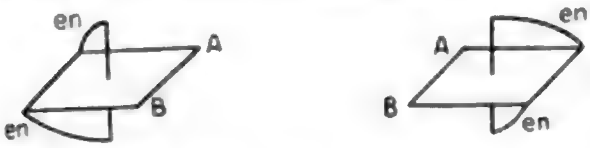


Wie nach diesen zu erwarten, läßt sich das Triäthylendiamin-kobaltichlorid in zwei aktiven Formen erhalten, von denen die eine links, die andere rechts drehend ist. Und ebenso das entsprechende Bromid, Nitrat usw.

Auch bei den Diäthylendiaminverbindungen läßt sich optische Aktivität voraussehen, und zwar gleichgültig, ob die beiden übrigbleibenden Stellen im Komplex durch zwei gleichartige oder durch zwei verschiedene Gruppen besetzt sind. Im ersten Falle erhält man die Raumbilder:



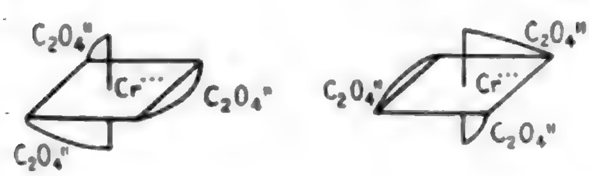
im zweiten Falle die Raumbilder:



Ebenso könnte an die Stelle der beiden 1-wertigen eine 2-wertige Gruppe treten.

Sowohl unter den Kobalt-, wie unter den Chromkomplexsalzen sind in neuerer Zeit eine größere Anzahl von Aethylendiaminsalzen bekannt geworden, die optische Aktivität zeigen so z. B. das Monammino-monobrom - diäthylendiamin - kobaltichlorid $(Co\,en_2BrNH_3)Cl_2$ und das entsprechende Bromid, Nitrat usw. Als Beispiel für die zweite Art von Verbindungen kann das Diäthylendiamin-dichloro-chromichlorid $(Cr\,en_2Cl_2)Cl$ und die analog zusammengesetzten Salze genannt werden.

Endlich erhält man auch optisch aktive Komplexsalze, wenn man für die 2-wertigen Neutralteile (Aethylendiamin) 2-wertige Ionen in den Komplex einführt. Als Beispiel für eine derartige Isomerieerscheinung seien das rechts- und linksdrehende Kalium-trioxalato-chromiat $K_3[Cr(C_2O_4)_3]$ genannt, deren komplexen Anionen die folgenden Raumformeln zukommen:



Literatur. *Vgl. den Artikel „Basen". Ferner* ***van 't Hoff****, Vorlesungen über Bildung und Spaltung von Doppelsalzen. Leipzig.*

E. H. Riesenfeld.

Salzlagerstätten.

1. Vorkommen und Entstehung im allgemeinen. 2. Die Salzminerale. 3. Die Salzgesteine: a) Einfache und zusammengesetzte Salzgesteine. b) Nomenklatur. c) Die Struktur der wichtigsten Salzgesteine. d) Die primäre Salzfolge. e) Deszendente und posthume Salzgesteine, der Salzhut. f) Die salzpetrographischen Provinzen. g) Untersuchungsmethoden der Salzgesteine. h) Der Salzton. 4. Die synthetischen Untersuchungen über die Entstehung der Kalisalzlagerstätten: a) Einleitung. b) Das System $NaCl$-KCl-H_2O. c) Doppelsalzbildung, das System KCl-$MgCl_2$-H_2O. d) Das System K, Mg, SO_4, Cl, H_2O. e) Mitberücksichtigung des Natriums. f) Die Kristallisationsbahnen. g) Der Temperatureinfluß. h) Untersuchungsmethoden. i) Mitberücksichtigung des Kalziums. 5. Die Anwendung der van 't Hoffschen Untersuchungen auf das Naturvorkommen. 6. Die wichtigsten Nebengemengteile der Kalisalzlagerstätten. 7. Die Tektonik der Salzlagerstätten. 8. Die Verarbeitung der Kalisalze.

1. Vorkommen und Entstehung im allgemeinen. Ablagerungen von Steinsalz kommen an vielen Stellen der Erde und wohl in allen geologischen Formationen vor.[1]) Wenn man bedenkt, daß das Ozeanwasser rund 3% Chlornatrium gelöst enthält, so ist dessen Auskristallisierung an geeigneten Stellen (abgeschnürte Becken und Busen) und unter günstigen Umständen (regenarmes, warmes Klima) von vornherein wahrscheinlich. Aber nicht nur ursprüngliche Meeresteile, sondern auch abflußlose Seen weisen oft eine Anreicherung von Salz auf, das nach der Auslaugung der Gesteine durch die Flüsse dem Sammelbecken zugeführt wird und bei der Verdunstung des Wassers zurückbleibt. So hat der Salzgehalt des Toten Meeres bereits eine Höhe von ca. 25% erreicht und andere bekannte Beispiele finden sich im Westen von Nordamerika, z. B. im Staate Utah; auch Steppengebiete und Wüsten zeigen oft Ausblühungen von Steinsalz.

Diese verschiedenen Vorgänge, die in der Jetztzeit, vor unseren Augen, stattfinden, werden sich auch in früheren Perioden der Erdgeschichte in ähnlicher Weise ab-

[1]) Viele Salzlagerstätten von Nordamerika sind silurischen und devonischen Alters, diejenigen von Hallein, Berchtesgaden und dem Salzkammergut gehören den Werfener Schichten (Trias) an, das Steinsalz von Wieliczka und das kalisalzführende Steinsalz von Kalusz sind tertiär.

gespielt haben. Die Bildung der Steinsalzablagerungen gehört daher zu den bestbekannten geologischen Problemen.

Anders verhält es sich mit der Entstehung der Kalisalzlagerstätten, die bis jetzt in größerem Maßstabe nur in Mittel- und Norddeutschland angetroffen wurden und dem oberen Zechstein, untergeordnet auch der Tertiärformation (im Oberelsaß, vgl. B. Förster, Mitteilungen der geologischen Landesanstalt von Elsaß-Lothringen 1911, **7**, 349 bis 524) angehören. Bei diesen Vorkommnissen sind auch die in geringerer Menge im Meerwasser enthaltenen Bestandteile, namentlich Magnesium- und Kaliumsalze als Chlorid und Sulfat, begleitet von vielen Nebengemengteilen, zur Ausscheidung gelangt. Die von Steinsalz und den sogenannten „Mutterlaugensalzen" gebildeten Schichten zeigen ein viel mannigfaltigeres Bild als die bloß Steinsalz führenden Ablagerungen und von ihnen, den Kalisalzlagern, wird im Nachfolgenden hauptsächlich die Rede sein.

Die deutschen Kalisalzlagerstätten wurden um das Jahr 1860 in Staßfurt zuerst entdeckt und alsbald erkannte man die hohe ökonomische Bedeutung dieser Naturprodukte. Zufälligerweise bildet Staßfurt den Mittelpunkt eines engen Bezirks, wo die Salze noch primär, in ihrer ursprünglichen Ablagerungsart erhalten geblieben sind. In den übrigen, später aufgeschlossenen Gebieten des Zechsteinsalzes haben mannigfache Umkristallisationen und tektonische Störungen das Bild der ursprünglichen Ausscheidung verwischt. Dieser Umstand hatte zur Folge, daß man für die Bildung der Kalisalze eine Vorstellung gewann („Barrentheorie" von Ochsenius), die sich für die Staßfurter Lagerstätte den Verhältnissen gut anzupassen schien, sich jedoch für die verwickelter gebauten sonstigen Kalisalzlager als zu eng und gekünstelt erwies. Die Theorie von Ochsenius wurde deshalb durch eine andere namentlich von J. Walther (Geschichte der Erde und des Lebens, 1908, S. 371) begründete Ansicht ersetzt. Nach ihm wurde ein Binnensee, der einen großen Teil des jetzigen Europas bedeckte, in der jüngeren Zechsteinzeit vom Ozean abgeschnitten. Als Grenzen dieses Binnensees sind ungefähr der Ural, die jetzige Donauebene, Irland und das skandinavische Gebirge anzunehmen. Im herrschenden Wüstenklima verdunstete diese Wasserfläche allmählich und schrumpfte zusammen, bis sie an der tiefsten Stelle in Mitteldeutschland gänzlich eintrocknete. Nur dort kamen auch die angehäuften Mutterlaugensalze in großer Menge zur Abscheidung, während an den randlichen Partien des Areals die wenig löslichen Salze wie Gips und Anhydrit, und das in großem Ueberschuß vorhandene Steinsalz sich reichlich ablagerten. Namentlich E. Erdmann wies auf die Wahrscheinlichkeit hin, daß Salzbäche und Flüsse die randlich abgelagerten Salze dem zentralen Becken noch weiter zuführten.

Aus der Waltherschen Theorie ergibt sich ein klares Bild, wie ein organisch zusammenhängendes Salzgebiet in Nord- und Mitteldeutschland und rund herum vereinzelte Kalisalzablagerungen, so in Inowrazlaw an der polnischen Grenze und ebenfalls im östlichen Teile der Niederlande sich bilden konnten. Ist also die tatsächliche Verbreitung der Kalisalze noch unbestimmt und vielleicht sehr ausgedehnt, so kommen doch nur die geschlossenen Bezirke, die sich um den Harz und den Thüringer Wald gruppieren, bisher hauptsächlich in Betracht.

2. Die Salzminerale. Die mineralische und chemische Beschaffenheit der Kalisalzlagerstätten zeigt, daß die Zusammensetzung des Meerwassers, welches die Salze bei der Verdunstung ausfallen ließ, von dem jetzigen Meerwasser nicht wesentlich verschieden war. Das heutige Meerwassersalz weist durchschnittlich die folgende Zusammensetzung auf

Natrium	30,54 %
Kalium	1,125
Magnesium	3,69
Kalzium	1,18
Chlor	55,29
Brom	0,185
SO_4	7,76
CO_3	0,20
Summe	99,97 %

Entsprechend ist auch Steinsalz NaCl das verbreitetste Mineral der Kalisalzlager. Daneben sind die wesentlichen Bestandteile

Sylvin KCl
Carnallit $KCl.MgCl_2.6H_2O$
Kieserit $MgSO_4.H_2O$
Anhydrit $CaSO_4$
Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$.

Weniger verbreitet oder nur lokal besonders angehäuft kommen vor

Bischofit $MgCl_2.6H_2O$
Langbeinit $K_2SO_4.2MgSO_4$
Schoenit $MgSO_4.K_2SO_4.6H_2O$
Polyhalit $MgSO_4.K_2SO_4.2CaSO_4.2H_2O$
Borazit $Mg_7Cl_2B_{16}O_{30}$.

Schließlich wäre noch eine Reihe von mehr seltenen Salzmineralen (besonders Sulfaten und Boraten) zu erwähnen (eine Zusammenstellung gibt H. E. Boeke, Uebersicht der Mineralogie, Petrographie und Geologie der Kalisalzlagerstätten, Berlin 1910), so daß die Zahl der sicher nachgewiesenen Salzminerale auf etwa 30 ansteigt.

Die Eigenschaften dieser Minerale sind in jedem Lehrbuche der Mineralogie beschrieben und sollen daher hier nicht näher behandelt werden. Nur einige Merkmale

zur Erkennung der wichtigsten Salzminerale im Dünnschliff mögen hier kurz zusammengefaßt werden.

Steinsalz. Isotrop mit schwachem Relief und klar durchsichtig, weil der Brechungsindex (1,5442 für Natriumlicht) mit demjenigen des Einbettungsmittels Canadabalsam nahezu übereinstimmt. Gewöhnlich grob kristallisiert mit Spaltrissen nach den Würfelflächen.

Sylvin. Isotrop mit deutlichem Relief, weil die Lichtbrechung (Index für Natriumlicht = 1,4903) erheblich von der des Canadabalsams abweicht; daher trübe im Gegensatz zu Steinsalz, womit er sonst im Dünnschliff übereinstimmt.

Carnallit. Meist grobkristallin, mit lebhaften Polarisationstönen. Oft Zwillingslamellierung nach zwei Richtungen (Fig. 1) und Einlagerung von sechseckigen roten oder gelben Eisenglanzblättchen.

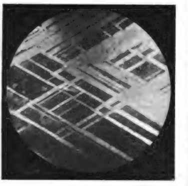


Fig. 1. Carnallit mit Zwillingslamellierung. Zwischen gekreuzten Nicols. Vergrößerung 25 fach.

Kieserit. Dicht oder in verrundeten Körnern mit wenig ausgeprägter Spaltbarkeit, oft einfache Zwillingsbildung, starke Doppelbrechung.

Anhydrit. Dicht oder in Kristallen, oft mit rechteckigem Umriß und deutlicher Spaltbarkeit (nach drei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen, die aber kaum jemals alle im Dünnschliff sichtbar sind). Doppelbrechung stark, jedoch schwächer als die des Kieserits.

Kainit. Abgerundete Körner mit einer Doppelbrechung wie diejenige des Carnallits, daher ebenfalls mit lebhaften Polarisationstönen.

Die Salzminerale unterscheiden sich von denjenigen der Eruptivgesteine allgemein durch eine konstante Zusammensetzung (Fehlen von isomorphen Vertretungen) und besitzen daher auch ein konstantes optisches Verhalten. Selbstverständlich genügen die oben angegebenen Merkmale nur für eine oberflächliche Identifizierung und es müssen bei genaueren Untersuchungen zahlenmäßige Bestimmungen herangezogen werden.

3. Die Salzgesteine. 3a) Einfache und zusammengesetzte Salzgesteine. Aus der Gesteinslehre ist es bekannt, daß die magmatischen Gesteine meist aus verschiedenen Mineralen bestehen und daher zu den zusammengesetzten Gesteinen gerechnet werden müssen, während die Sedimente oft aus nur einem wesentlichen Bestandteil aufgebaut sind; derartige einfache Gesteine sind Kalkstein, Dolomit, Kieselschiefer. Unter den Salzgesteinen gehören Steinsalz, Anhydrit, Gips, wie sie in der Natur in großen Massen auftreten, zu den einfachen Gesteinen, während die Kalisalzgesteine trotz ihrer echt sedimentären Natur aus vielen Mineralen zusammengesetzt sind und daher in dieser Hinsicht den magmatischen Gesteinen näher stehen. Diese Eigentümlichkeit erklärt sich aus der Genese: die Steinsalz- und Anhydrit- (bezw. Gips-) Massen bildeten sich im Anfang der Meerwasserverdunstung, die Kalisalze dagegen aus einer konzentrierten Endlauge, in welcher auch die untergeordneten Bestandteile der Meerwassersalze sich angereichert hatten. Demzufolge ist die kalisalzliefernde wässerige Lösung genau so wie das silikatische Magma eine Flüssigkeit aus einer großen Anzahl von Komponenten in relativ reichlicher Menge und es besteht zwischen den beiden ein weit geringerer Unterschied als man noch vor wenigen Jahren, besonders mit Rücksicht auf die verschiedene Temperatur, anzunehmen geneigt war. Dieselben Gesetze beherrschen die Kristallisation in beiden Fällen. Diese Uebereinstimmung hat die Bildung von Gesteinen verursacht, die ähnlich aussehen und nach denselben Methoden untersucht werden müssen. Bei den Magmengesteinen bildete bis vor kurzer Zeit die beschreibende Methode fast den ganzen Inhalt dieses Wissenschaftszweiges, erst in den letzten Jahren werden experimentelle Forschungen über die Gesetze der Gesteinsgenese vielerorts durchgeführt (vgl. den Artikel „Mineral- und Gesteinsbildung [aus dem Schmelzfluß]" in diesem Handwörterbuch). Bei den Kalisalzen dagegen ist der gewöhnliche Gang der naturwissenschaftlichen Forschung umgekehrt, indem erst nach dem Abschluß der synthetischen Untersuchungen, die sich vor allem an den Namen van't Hoff knüpfen (vgl. Abschnitt 4), jetzt auch die wissenschaftliche Beschreibung der Salzgesteine durchgeführt wird.

3b) Nomenklatur. Solange die Kali-

salze nur hauptsächlich von technischer Seite bearbeitet wurden, genügten auch technische Namen wie Carnallit für ein zu ca. 60% aus dem Carnallitmineral bestehendes Gestein, Hartsalz für ein Gestein aus Sylvin, Steinsalz und Kieserit oder Anhydrit. Bei der wissenschaftlichen Bearbeitung machte sich jedoch alsbald das Bedürfnis geltend neben den technischen Namen auch genauere Bezeichnungen einzuführen. Eine solche Nomenklatur wurde von F. Rinne (Praktische Gesteinskunde, 1908, S. 260) angegeben und hat sich schnell eingebürgert. Danach wird das Gestein nach den dasselbe im wesentlichen aufbauenden Mineralen benannt, wie die nachfolgenden Namen der hauptsächlichsten Kalisalzgesteine erläutern.

Gestein aus:	petrographische Namen	technische Namen
Steinsalz und Sylvin	Sylvinhalit	Sylvinit
vorwiegend Sylvin, dazu Steinsalz	Halitsylvin oder Halitosylvin	
Carnallit, Steinsalz, Kieserit	Kieseritischer Halitcarnallit	Carnallit
Steinsalz, Sylvin, Kieserit	„ Sylvinhalit	Hartsalz
Steinsalz, Sylvin, Anhydrit	Anhydritischer „	Anhydrithartsalz
Steinsalz, Kainit	Kainithalit	Kainit

3c) Die Struktur der wichtigsten Salzgesteine. Viele Salzgesteine weisen eine deutliche Schichtung auf und zwar derart, daß jede Schicht ein Mineral in überwiegender Menge enthält, das dann in den anderen Schichten zurücktritt. So ist das ältere, von Anhydrit oder Polyhalit begleitete Steinsalz sehr deutlich geschichtet, indem ca. 8 cm mächtige Lagen aus fast reinem Chlornatrium mit ca. $\frac{1}{2}$ cm dicken Schnüren von vorwiegend anhydritischer oder polyhalitischer Beschaffenheit regelmäßig abwechseln. Auch im Hartsalz ist die Schichtung meist sehr ausgeprägt. Im Gegensatz dazu stehen viele Carnallitgesteine. Zum Teil sind auch diese bankig entwickelt, wie im Staßfurter Bezirke, sehr oft aber konglomeratisch oder breccienartig. In den konglomeratischen Carnallitgesteinen sind ziemlich gleichmäßig walnußgroße Knollen aus Steinsalz, Kieserit oder Anhydrit lose schwebend in einem vorwiegend carnallitischen Bindemittel verteilt. In den Brecciencarnalliten dagegen liegen im Carnallit eckige Bruchstücke und bis metergroße Schollen von geschichtetem Kieserit und Steinsalz, die oft die merkwürdigsten Faltungen aufweisen. Die Bildung dieser Gesteine ist noch nicht befriedigend erklärt. Während der konglomeratische Carnallit auf eine Verkittung von durch Strömungen verschleppten Salzgeröllen nach Art eines groben Sandsteins hindeuten dürfte, ist diese Entstehungsweise für die Brecciencarnallite unwahrscheinlich. Neuerdings hat Sv. Arrhenius (Mitteilungen des Nobelinstituts der K. Akad. d. Wissensch. Stockholm 1912 Bd. 2 Nr. 20) die Ansicht ausgesprochen, daß das stark wasserhaltige Carnallitgestein (und eventuell auch primärer Kainit) infolge der Ueberlagerung jüngerer geologischer Schichten und der dadurch entstandenen Erwärmung vorübergehend breiig geworden ist und unter Mitwirkung des Nebengesteins dabei die erwähnte brecciöse Struktur angenommen hat.

Schließlich erscheinen auch manche kieserit- und anhydritfreie Salzgesteine (Halitcarnallite, Sylvinhalite) massig, indem entweder das Fehlen der dunklen tonig-sulfatischen Bestandteile eine Schichtung in der gleichmäßig weißen oder rötlichen Masse makroskopisch unsichtbar macht oder wirklich ein gleichmäßiges Durcheinander der das Gestein aufbauenden Minerale vorliegt.

3d) Die primäre Salzfolge. Nur in einem eng begrenzten Teile des Kalisalzbezirks und zwar in dem zuerst als kalisalzführend erkannten Staßfurter Becken, sind die ursprünglichen Ablagerungen anscheinend erhalten geblieben. Wir lassen hier das Profil der ganzen Zechsteinformation für die erwähnte Stelle folgen, wie es von H. Everding (Festschrift zum 10. allgemeinen deutschen Bergmannstage in Eisenach. Berlin 1907) zusammengefaßt worden ist. Spätere Untersuchungen namentlich von O. Riedel (Zeitschr. f. Kristall. 1912, 50, 139 bis 173) haben eine mehr ins einzelne gehende Gliederung der Salzfolge ergeben, die jedoch im wesentlichen mit den älteren Angaben übereinstimmt. Die Schichtenfolge von der Anhydritregion bis zum grauen Salzton wird als primäre Salzfolge bezeichnet.

Unterer Buntsandstein

oberer Zechstein	20 bis 30 m	roter Ton mit Anhydrit und Steinsalz
	50 m	Steinsalz
	1 „ 5 m	Anhydrit mit Steinsalz (sog. Pegmatitanhydrit)
	5 „ 15 m	roter Salzton
	100 „ 150 m	jüngeres Steinsalz
	40 „ 90 m	Hauptanhydrit
	4 „ 10 m	grauer Salzton
	30 „ 40 m	Carnallitregion
	20 „ 40 m	Kieseritregion
	40 „ 60 m	Polyhalitregion
	300 „ 500 m	Anhydritregion
mittlerer Zechstein	70 „ 100 m	älterer Anhydrit mit Dolomit und Steinsalzeinlagerungen
unterer Zechstein	4 „ 10 m	Zechsteinkalk
	0,5 „ 4 m	Kupferschiefer und Zechsteinkonglomerat

Oberes Rotliegendes.

Von diesen Gesteinsschichten ist die Carnallitregion der Hauptträger des Kalisalzes. Ihre Zusammensetzung entspricht durchschnittlich 59% Carnallit, 22% Steinsalz, 16% Kieserit, 2% Anhydrit und 1% Ton.

3e) **Deszendente und posthume Salzgesteine, der Salzhut.** Bei weitem die meisten Kalisalzgesteine sind durch Umkristallisation aus dem primären Lager hervorgegangen, und zwar noch vor der Bildung des grauen Salztons. Diese Umlagerungsprodukte wurden von Everding als ältere Deszendenz bezeichnet, während die im Hangenden des grauen Salztons vorkommenden, auch noch dem Zechstein angehörenden Salze als jüngere Deszendenz bezeichnet wurden.

Auch schon in der Staßfurter Lagerstätte ist ein Teil der primären Carnallitregion durch älteres deszendentes Steinsalz und Kalisalz (Hartsalz und Kieserithalitcarnallit) ersetzt (vgl. in Fig. 2 das Profil des Staßfurter Lagers nach Everding l. c. Tafel IV). Südlich vom Harz kommen über einem Rumpf von älterem Steinsalz (Anhydritregion) nur noch ältere deszendente Kalisalze vor, die von dem völlig normal entwickelten grauen Salzton (vgl. unten 3h) überlagert werden. Im hannoverschen Gebiete dagegen ist besonders das jüngere deszendente Salz stark entwickelt und mit Kalisalzlagern im Steinsalz ausgestattet. Auf diese Eigentümlichkeit wird im Abschnitt 7 etwas näher eingegangen werden.

Im Gegensatz zu den Umkristallisationen, die sich kurz nach der Ausscheidung der Salze, noch während der Zechsteinzeit ereigneten, sind auch in viel jüngeren geologischen Perioden deutliche Veränderungen im Salz vor sich gegangen, welche Everding als posthume Salzbildungen bezeichnete. Namentlich die starken Faltungsprozesse der Tertiärzeit, welche das Harzgebirge und den Thüringer Wald empordrängten, haben auch vielerorts die Zechsteinsalze so nahe an die Erdoberfläche gebracht, daß zirkulierendes Wasser lösend einwirken konnte. Vielfach, z. B. im Untergrunde des hannoverschen Eichsfeldes, wurde das Salz gänzlich fortgeführt, oft löste sich nur das Chlormagnesium des Carnallitgesteins und trat das übrigbleibende Chlorkalium mit dem Kieserit zu Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$ zusammen. Derartige Vorkommnisse von Kainitgestein (Kainit + Steinsalz) werden im Anschluß an den „eisernen Hut“ der Erzlagerstätten (vgl. den Artikel „Erzlagerstätten“) als Salzhut bezeichnet. In Figur 3 ist der Salzhut des primären Staßfurter Lagers nach Everding (l. c. Tafel I) wiedergegeben. Man sieht deutlich, wie die lösende Wirkung am Salzton entlang am tiefsten eingedrungen ist. An einzelnen Stellen (z. B. Aschersleben) setzen sich Steinsalzbänke der Carnallit-

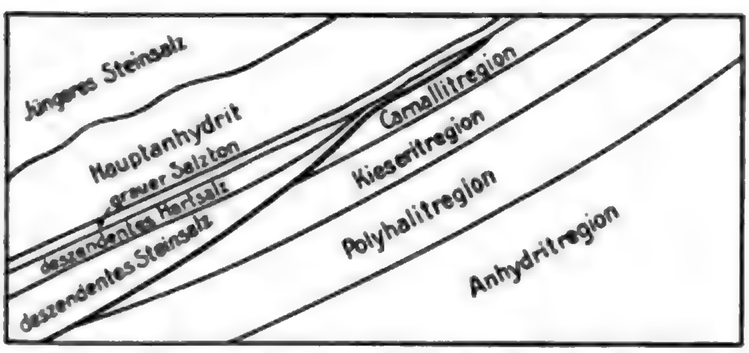


Fig. 2. Primäres Lager und ältere Deszendenz in Neustaßfurt. Nach Everding.

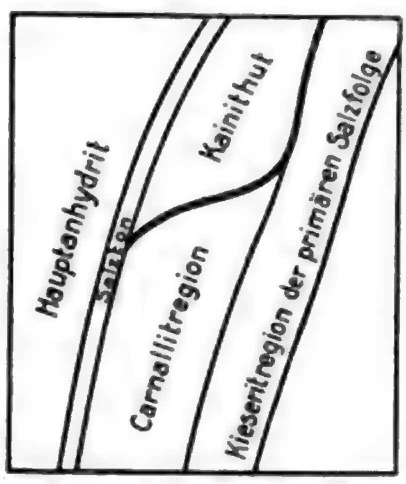


Fig. 3. Salzhut über dem primären Carnallit von Westeregeln bei Staßfurt. Nach Everding.

region in das Kainitgestein fort, zum Zeichen, daß der Kainit, wie oben erwähnt wurde, aus dem ursprünglichen Carnallitgestein hervorgegangen ist.

3f) Die salzpetrographischen Provinzen. Die besonders durch den Harz und den Thüringer Wald bedingte Oberflächengestaltung gliedert das mitteldeutsche Kalisalzgebiet in vier Teile, die sich auch durch den Charakter der Salzgesteine deutlich unterscheiden und daher als salzpetrographische Provinzen bezeichnet werden können. Diese Provinzen mit ihren wesentlichen Merkmalen sind die folgenden:

1. Die Magdeburg-Halberstädter Mulde zwischen Harz und Flechtinger Höhenzug. In diesem Gebiet findet sich der berühmte Staßfurt-Westeregelnsche Sattel mit der typisch entwickelten primären Salzfolge.

2. Der Südharzbezirk zwischen Harz und Thüringer Wald. Die „Gauverwandtschaft" der Salzgesteine in dieser Provinz im Gegensatz zu der vorhergehenden beruht wesentlich auf dem hohen Anhydrit- und Tongehalt, während die Salzgesteine der Magdebuıg-Halberstädter Mulde Kieserit als wesentlichen sulfatischen Gemengteil enthalten. Der konglomeratische Carnallit des Südharzbezirks weist diese Eigentümlichkeit jedoch nicht auf, sondern ist normal kieserithaltig.

3. Das Werra- und Fuldagebiet zwischen Thüringer Wald und Vogelsgebirge. Dieser Bezirk nimmt im Kalisalzgebiete eine Sonderstellung ein, indem der graue Salzton und der Hauptanhydrit fehlen, und dafür ein dolomitischer Ton, der sogenannte Plattendolomit, das Salz überlagert. Dieser Plattendolomit entspricht wahrscheinlich den Gesteinsschichten die im sonstigen Gebiete den Uebergang des Zechsteins zum Buntsandstein bilden. Die Salze des Werra-Fuldagebiets bestehen aus zwei sehr regelmäßig horizontal gelagerten Kalisalzflözen im Steinsalz. Sie sind meist weiß infolge des Zurücktretens von rotfärbendem Eisenglanz und oft konglomeratisch entwickelt. Stellenweise sind die Salzlager dieses Gebiets von basaltischem Magma gangartig durchbrochen worden (wie es auch in der alpinen Salzlagerstätte von Hallstatt beobachtet worden ist). Weitgehende Kontaktwirkungen haben diese Durchbrüche nicht verursacht, jedoch sind Kohlensäureanhäufungen im Salz dadurch entstanden, die beim Abbau oft Explosionen zur Folge hatten.

4. Das Nördliche und Nordwestliche Harzvorland (im engeren Sinne Hannoverscher Bezirk). Neben den normal ausgebildeten älteren deszendenten, vielleicht auch primären kieseritischen Sylvinhaliten und Halitcarnalliten sind in diesem Bezirke besonders die jüngeren deszendenten Salze stark entwickelt. Oft kommen im jüngeren Steinsalze kieseritfreie Sylvinhalite und Halitcarnallite vor, die im Staßfurter Bezirke fehlen. Die stark gestörte Lagerung gerade der mächtigen Salzschichten der Hannoverschen Salzprovinz ist im Abschnitt 7 näher behandelt.

3g) Untersuchungsmethoden der Salzgesteine. Die petrographische Untersuchung der Salzgesteine schließt sich an diejenige der Eruptivgesteine eng an. Besonders werden angewandt: die chemische Bauschanalyse, die Trennung der Gemengteile mit Hilfe von schweren organischen Flüssigkeiten (meist genügen Azetylentetrabromid $C_2H_2Br_4$ mit dem spezifischen Gewicht 3.0 und seine leichteren Mischungen mit Benzol oder Xylol), die mikroskopische Dünnschliffuntersuchung. Eine eingehende mikroskopisch-petrographische Untersuchung einer Salzlagerstätte wurde von M. Naumann (Beitrag zur petrographischen Kenntnis der Salzlagerstätte von Glückauf-Sondershausen, N. Jahrb. f. Mineral. 1911, Beil. Bd. 32, 578 bis 626) durchgeführt, während H. E. Boeke eine graphische Darstellung der Salzgesteine angab, welche die Mineralführung des Gesteins schnell zu übersehen gestattet (N. Jahrb. für Mineral. 1909, II, 29 bis 32. Kali 1910. 4, 1 bis 5).

3h) Der Salzton. Der im ganzen Kalisalzgebiete (mit Ausnahme der Werra-Fuldaprovinz) mit großer Regelmäßigkeit auftretende graue Salzton besteht an den meisten Stellen aus drei verschieden zusammengesetzten Schichten und zwar:

eine liegende tonig anhydritische,
eine mittlere tonig-sandige und
eine hangende tonig-magnesitische Schicht.

Besonders das Magnesitvorkommen (bis 50% $MgCO_3$) im oberen grauen Salzton ist sehr auffallend, weil sonst Magnesit als sedimentäre Bildung selten ist.

Ohne Zweifel ist der Salzton zum Teil eine äolische Bildung, also durch Ablagerung vom Winde transportierter Stoffe hervorgebracht. Auch die im Salzton nachgewiesenen Teilchen von Zirkon und Turmalin, die im sonstigen Salze fehlen, legen davon Zeugnis ab. Andererseits dürfte der Salzton zum Teil auch aus zusammengesunkenen Tonbestandteilen fortgelöster Chlormagnesiumsalze entstanden sein. Die petrographische Bearbeitung des Salztons wurde von C. Reidemeister (Dissertation Kiel 1911) ausgeführt.

4. Die synthetischen Untersuchungen über die Entstehung der Kalisalzlagerstätten. 4a) Einleitung. Im vorhergehenden haben wir gesehen, daß die Salzgesteine im wesentlichen durch Kristallisation aus einer sehr konzentrierten wässerigen Lösung von Na, K, Mg und Ca als Sulfate und Chloride entstanden sind. Die

Gesetze der Kristallisation einer solchen Lösung werden also für die Salzbildung maßgebend sein. Zur Ermittelung dieser Gesetze kann man nun in zweierlei Weise vorgehen und zwar nach der analytischen oder der synthetischen Methode. Nach der ersten, analytischen Methode geht man von der fertigen Lösung, sei es eine natürliche oder künstliche, aus und stellt die beim Verdampfen der Reihe nach ausfallenden „Bodenkörper“ fest. Diese an sich einwandfreie Methode wurde schon im Jahre 1849 von Usiglio bei natürlichem Meerwasser angewandt. Es stellte sich jedoch heraus, daß die Frage zu verwickelt ist, um auf eine derart einfache Weise gelöst zu werden: Ueberschreitungen der Gleichgewichtszustände treten auf, verschiedene gleichzeitig ausfallende Salze lassen sich schwer trennen und identifizieren, viele nach dem Naturvorkommen zu erwartende Verbindungen treten überhaupt nicht auf usw. Daher haben die Untersuchungen von Usiglio zur Erklärung der Ausscheidungsfolge in den Salzlagerstätten kaum beigetragen. Das Problem mußte in einer grundsätzlich anderen Weise in Angriff genommen werden und zwar so, daß zunächst einfache Teilsysteme des ganzen Komplexes in ihren Gleichgewichten unter genau bekannten Umständen der Konzentration und der Temperatur bearbeitet und dann allmählich die Zahl der Komponenten vermehrt, die äußeren Bedingungen geändert wurden. Nach diesem Verfahren war es schließlich möglich, das Verhalten beim Eintrocknen für eine beliebige Lösung der einschlägigen Bestandteile vorherzusagen. Erst wenn die dabei herrschenden Gleichgewichtszustände genau bekannt sind, können die Abweichungen vom Gleichgewicht, wie sie in der Natur stets mehr oder weniger vorliegen, beurteilt werden. Ein vollständig erreichtes Gleichgewicht bleibt immer Idealfall. Man vergleiche den Artikel „Salze“.

Es ist das hervorragende Verdienst von van't Hoff das Problem mit Hilfe der zum Teil auch von ihm gefundenen physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten und Methoden in einer etwa zwölfjährigen Arbeitsperiode gelöst zu haben. Die etwa 30 Forscher, welche ihm dabei behilflich gewesen sind, sind genannt in dem zusammenfassenden Werke: J. H. van't Hoff, Zur Bildung der ozeanischen Salzablagerungen, Braunschweig 1905 und 1909. Im nachfolgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeiten kurz besprochen werden.

4b) Das System $NaCl$-KCl-H_2O. Gemischte Lösungen von Chlornatrium und Chlorkalium lassen bei der Sättigung die beiden Salze rein ausfallen im ganzen für die natürliche Salzbildung in Betracht kommenden Temperaturgebiet. Tragen wir die Menge Chlorkalium in der gesättigten Lösung als Abszisse eines Koordinatensystems ein, die Menge Chlornatrium als Ordinate, so erhält man das Diagramm Figur 4. Die Linie ab gibt die abnehmende Löslichkeit des Chlornatriums für eine bestimmte Temperatur an, wenn der Chlorkaliumgehalt der Lösung steigt. Der Punkt b stellt die einzige

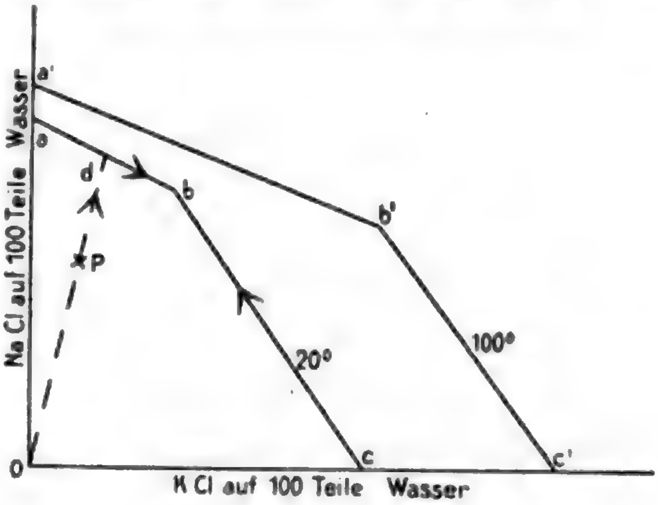


Fig. 4.

Lösung dar, die bei der gewählten Temperatur (und Atmosphärendruck) an Chlorkalium und Chlornatrium gleichzeitig gesättigt ist. Eine ungesättigte Lösung P durchläuft bei der isothermen Verdunstung des Wassers zunächst die Bahn Pd, in d fängt Chlornatrium an sich abzuscheiden und die Lösung ändert sich entsprechend in der Richtung des höheren KCl-Gehalts an db entlang. In b fallen NaCl und KCl gleichzeitig aus und man kann die Lösung daher ohne weitere Aenderung der Zusammensetzung bis zur Trockne eindampfen. Der Punkt b ist ein Kristallisationsendpunkt.

Bei zunehmender Temperatur zeigt sich nun ein ganz eigenartiges und besonders für die Technik (vgl. Abschnitt 8) wichtiges Verhalten. Während die Löslichkeit des reinen Chlornatriums in Wasser mit der Temperatur schwach ansteigt, wird sie bei gleichzeitiger Sättigung an Chlorkalium bei zunehmender Temperatur geringer, wie es die nachfolgende Tabelle zeigt:

Temp.	100 Teile Wasser lösen			
	NaCl	KCl	NaCl zugleich	mit KCl
20°	36,01	34,67	29,2	14,7
40°	36,64	40,14	28,2	19,5
60°	37,25	45,62	27,2	24,6
80°	38,22	51,09	26,4	30,0
100°	39,61	56,56	25,7	35,9

Die Folge davon ist, daß eine bei hoher Temperatur z. B. 100° an NaCl und KCl

gesättigte Lösung bei der Abkühlung nur Chlorkalium ausfallen läßt.

4c) Doppelsalzbildung, das System $KCl-MgCl_2-H_2O$. Wiederum tragen wir (Fig. 5) die Chlorkaliummenge der Lösung

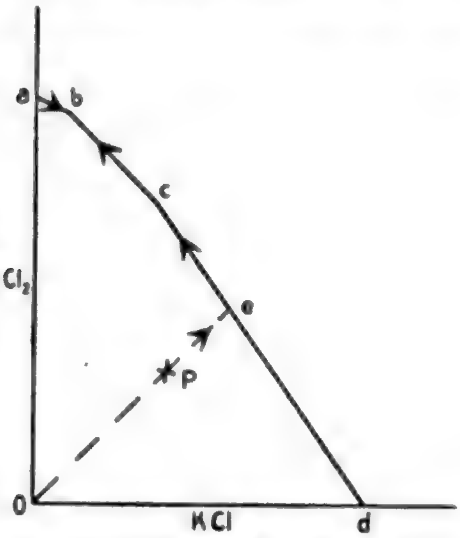


Fig. 5. Schematische Darstellung der Carnallitbildung aus einer KCl- und $MgCl_2$-haltigen Lösung.

in Molekülen auf eine konstante Menge Wasser (z. B. 1000 Mol) auf die Abszissenachse ein und die Chlormagnesiummenge als Ordinate. Bei steigendem Gehalt an Chlormagnesium nimmt die Löslichkeit des Chlorkaliums ab. Ist ein bedeutender Ueberschuß an Chlormagnesium im Vergleich zum Chlorkalium in der Lösung vorhanden, so fällt nicht mehr das Chlorkalium, sondern ein Doppelsalz und zwar Carnallit $KCl.MgCl_2.6H_2O$ aus. Auch für dieses Doppelsalz ist eine Löslichkeitslinie (cb in Fig. 5) einzutragen. Schließlich gibt uns die kurze Linie ab die Löslichkeit der Komponente Chlormagnesium (als Hexahydrat) in einer chlorkaliumhaltigen Lösung an. Das Löslichkeitsdiagramm besteht also in diesem Fall aus drei sich gegenseitig schneidenden Linien.

Eine ungesättigte Lösung von Carnallit (P in Fig. 5) muß auf der Halbierungslinie des Koordinatenwinkels liegen, weil in P die beiden Komponenten in gleicher molekularer Menge vorhanden sind. Dampft man die Lösung P ein, so wird die Löslichkeitslinie cd des Chlorkaliums in e getroffen, d. h. Chlorkalium scheidet sich ab und die „Kristallisationsbahn" wird durch ec dargestellt. Die Lösung c ist gleichzeitig an Carnallit und KCl gesättigt. Weil jedoch in c ein Ueberschuß an Chlormagnesium vorhanden ist, ist es selbstverständlich unmöglich, die Konzentration von c innezuhalten unter Ausscheidung von $MgCl_2$ und KCl im selben Verhältnis (als Carnallit) und dazu noch von Chlorkalium. Es muß vielmehr das schon ausgeschiedene Chlorkalium unter Carnallitbildung aufgezehrt werden. Entfernt man aber das ausgefallene Chlorkalium aus der Lösung, so kann die weitere Kristallisationsbahn cb unter Carnallitbildung durchlaufen werden bis zum Kristallisationsendpunkte b. Dort wird die Lösung unter Bischofit- und Carnallitbildung ohne weitere Aenderung der Zusammensetzung eintrocknen. Auch bei der Erstausscheidung von Bischofit wird derselbe Kristallisationsendpunkt b erreicht. Pfeile in der Figur geben die Kristallisationsbahnen an.

Behandelt man umgekehrt festen Carnallit mit wenig Wasser, so muß sich KCl ausscheiden bis sich in der Lösung ein genügender Ueberschuß an Chlormagnesium gebildet hat, um mit Carnallit im Gleichgewicht sein zu können. Dieser unter dem Mikroskop leicht zu verfolgende Vorgang dient als Reaktion auf Carnallit.

4d) Das System K, Mg, SO_4, Cl, H_2O. Ist neben den Chloriden von Kalium und Magnesium auch Sulfat vorhanden, so lassen sich die Sättigungsverhältnisse bei gegebener Temperatur noch eindeutig quantitativ in einer ebenen Figur darstellen, wie die folgende Ueberlegung zeigt. Die verschiedenen Komponenten treten je nach den relativen in der Lösung vorhandenen Mengen zu verschiedenen Doppelverbindungen zusammen. Zur graphischen Darstellung, die eine Beurteilung des Kristallisationsgangs erlaubt ohne Rechnungen mit Hilfe von Tabellen, wird daher nur eine Berücksichtigung dieser gelösten Komponenten, nicht des Wassers, erforderlich sein. Weiterhin herrscht in der Lösung chemische Neutralität, die Menge des Chlors wird also nach dem Molekularschema:

$$Cl_2 = K_2 + Mg - SO_4$$

aus den drei anderen berechenbar sein. Es genügt mithin das Verhältnis $K_2 : Mg : SO_4$ einzutragen und dieses aus zwei Größen bestehende Verhältnis dreier Zahlen läßt sich in einer (zweidimensionalen) Ebene quantitativ darstellen.

4e) Mitberücksichtigung des Natriums. Ist auch Natriumsalz in der Lösung vorhanden, so vermehrt sich die Mannigfaltigkeit des Systems und damit die Anzahl der Dimensionen, welche für eine quantitative graphische Darstellung nötig ist. In dem Artikel „Phasenlehre" ist auseinandergesetzt, daß die Anzahl der Freiheiten eines Systems gleich bleibt, wenn mit der Zunahme der Komponenten um eine sich auch die Phasenzahl um eins vermehrt. Entsprechend dieser Tatsache bestimmte van't Hoff die Gleichgewichte im betreffenden System immer unter gleichzeitiger Sättigung an Chlornatrium, was auch mit dem Naturvorkommen im Einklang ist, weil die Salzgesteine fast ausnahmslos steinsalzhaltig

sind. Bei dieser Annahme ist die eindeutige Darstellung in der Ebene mithin möglich, ohne daß die Natriummenge in der Lösung mit eingetragen wird.

Die von van't Hoff gewählte Darstellung der experimentell festgelegten Löslich-

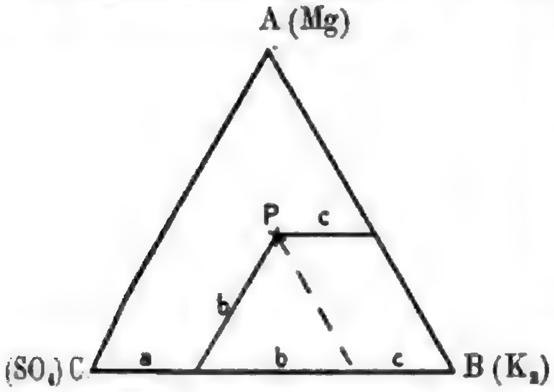


Fig. 6.

keitswerte ist keine eindeutige. Eine solche wurde erst später von E. Jänecke und von H. E. Boeke (Zeitschr. f. Kristall. 1910, 47, 273 bis 283) angegeben und zu verschiedenen Schlußfolgerungen verwendet. Diese einfachen Diagramme erlauben es alle wesentlichen Ergebnisse des van't Hoffschen Untersuchungszyklus im Zusammenhang zu übersehen. Die Darstellung geschieht folgendermaßen:

Die molekularen bezw. atomistischen Mengen K_2, Mg und SO_4 werden auf die Summe 100 gebracht und die so gewonnenen Atomprozente K_2 als Abszisse, die Atomprozente Mg als Ordinate eines Koordinatensystems mit einem Winkel von 60° eingetragen. Ergänzt man das gleichzeitige Dreieck, wie es in Figur 6 geschehen ist, so ergibt es sich, daß für jeden beliebigen Punkt P die Molekülprozente SO_4 durch die horizontale Strecke c dargestellt werden (für jeden Punkt P ist a + b + c = der Seite des Dreiecks, die zu 100 angenommen wird).

Im Eckpunkte A kommt eine nur Magnesium, Natrium und Chlor enthaltende Lösung oder das Salz Bischofit $MgCl_2 . 6H_2O$ zur Darstellung, im Eckpunkte B in derselben Weise eine aus Chlorkalium und Chlornatrium bestehende Lösung oder das Salz

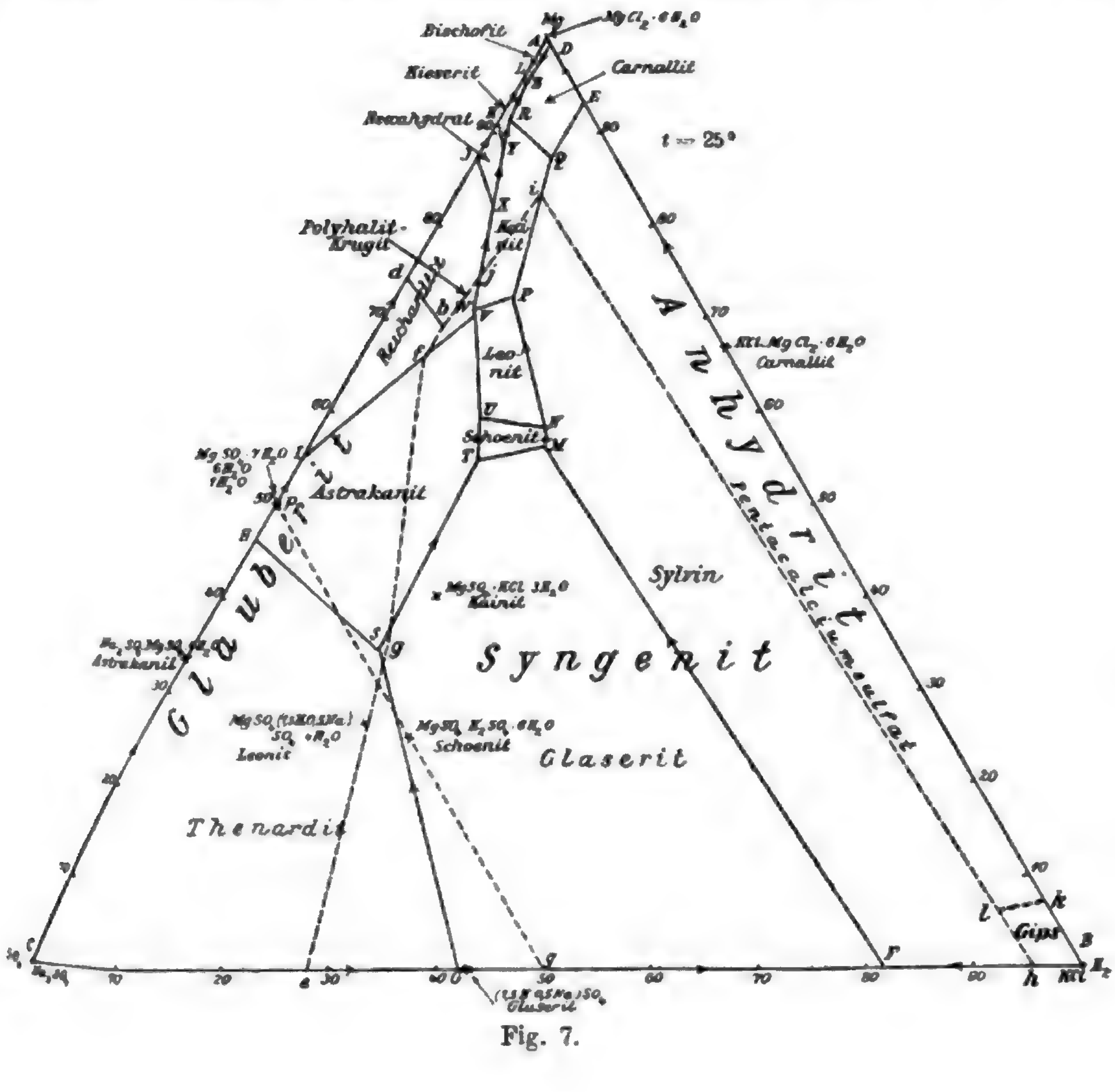


Fig. 7.

Sylvin KCl. In C ist weder Magnesium noch Kalium vorhanden, hier findet sich also alle Schwefelsäure an Natrium gebunden. C ist somit der darstellende Punkt für das Salz Thenardit Na_2SO_4. Auf der Seite AB werden die Gleichgewichte in Lösungen von Chlorkalium und Chlormagnesium (mit Chlornatrium) dargestellt, wie sie für sich an der Hand der Figur 5 erläutert wurden. Im Inneren des Dreiecks finden die Lösungen ihre Darstellung, die alle in Betracht kommenden Komponenten enthalten. Je nach dem Verhältnis dieser Komponenten teilen sich die Lösungen in verschiedene Gruppen, die jedesmal bei der Verdunstung einen gewissen Bodenkörper (neben Steinsalz) ausfallen lassen. Diese Gruppen werden im Diagramm durch Felder dargestellt.

Nehmen wir als Beispiel das jetzige Ozeanwasser. Nach van't Hoff hat dieses nach der Verdunstung bis zur anfangenden Chlornatriumausscheidung die Zusammensetzung

1064 Mol H_2O 100 NaCl 2,2 KCl 7,8 $MgCl_2$ 3,8 $MgSO_4$.

Daraus berechnet sich das Verhältnis K_2: Mg:SO_4 = 6,7:70,3:23. Die Lösung wird also bei 25° durch einen Punkt im Reichardtit ($MgSO_4.7H_2O$)-Felde, bei 83° durch einen solchen im Loeweit ($Na_2SO_4.MgSO_4.2\frac{1}{2}H_2O$)-Felde dargestellt. Folglich muß die Lösung bei 25° neben Steinsalz zuerst Reichardtit, bei 83° Loeweit ausfallen lassen.

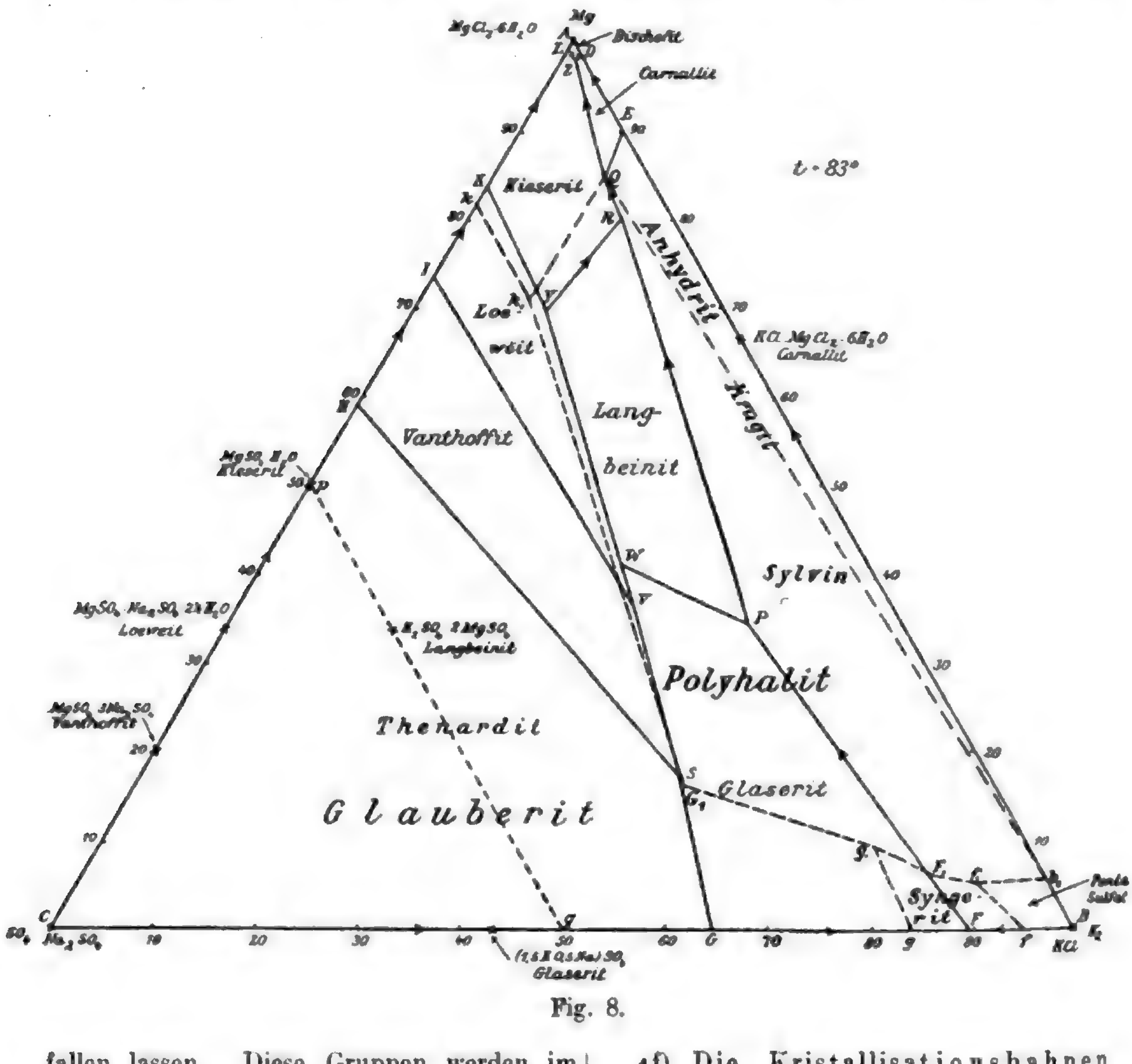


Fig. 8.

Die Gleichgewichte für zwei Temperaturen, 25 und 83°, sind von van't Hoff vollständig festgelegt und in den Figuren 7 und 8 dargestellt. Die gestrichelten Linien beziehen sich auf die Kalziumsalze und werden später kurz besprochen werden.

4f) Die Kristallisationsbahnen. Scheidet sich ein Bodenkörper ab, so ändert sich im allgemeinen die restierende Lösung in ihrer Zusammensetzung, und zwar läßt sich beweisen, daß diese Aenderung auf einer geraden Linie vom darstellenden Punkte des Bodenkörpers aus stattfindet. Diese einfache Beziehung

ist ein wesentlicher Vorzug der oben angegebenen Darstellungsweise. Bei fortschreitender Verdunstung und Salzabscheidung wird eine Grenze zweier Felder getroffen. Hier besteht gleichzeitig Sättigung an zwei Bodenkörpern (abgesehen vom Steinsalz) und folglich muß die Kristallisationsbahn ihre Richtung ändern. Es liegen hierbei zwei Möglichkeiten vor. Befinden sich die darstellenden Punkte der beiden Bodenkörper an verschiedenen Seiten der Feldergrenze oder ihrer geradlinigen Verlängerung (Fig. 9), so bedingt die Ausscheidung von Salz R eine Aenderung der Lösung Q an Qr entlang, diejenige von Salz S eine solche nach Qs. Die Resultante dieser beiden Bewegungen fällt mit der Feldergrenze zusammen und folglich scheiden die beiden Bodenkörper sich nebeneinander aus. Die Feldergrenze ist eine Kristallisationsbahn. In den Figuren 7 und 8 sind Feldergrenzen von dieser Beschaffenheit mit Pfeilen versehen.

Liegen dagegen R und S an derselben Seite der Feldergrenze (Fig. 10 und 11), so sind wieder zwei Fälle zu unterscheiden. Werden die ausgefallenen Mengen des Bodenkörpers entfernt (d. h. im Naturvorkommen abgelagert und überkrustet und dadurch der Reaktion mit der Mutterlauge entzogen), so wird von Q ab das Salz S an Stelle von R allein ausfallen (Fig. 10). Bleibt dagegen das schon abgeschiedene R mit der Lösung in Berührung, so wird nur eine Aufzehrung von R unter Neubildung von S eine Aenderung der Lösung an der Feldergrenze entlang, also im Gleichgewichte mit den beiden Bodenkörpern, möglich machen. Ist schließlich alles R aufgezehrt, was in Q_1 auf der Verlängerung von SP (Fig. 11) der Fall ist, so tritt die Kristallisationsbahn in das Feld für S ein unter alleiniger Ausscheidung dieses Salzes. Es möge dem Leser überlassen werden die Kristallisationsbahn einer beliebigen Lösung an der Hand dieser Ausführungen und der Figuren 7 und 8 zu verfolgen. Ein ausführliches Beispiel findet sich in H. E. Boeke „Ein Schlüssel zur Beurteilung des Kristallisationsverlaufs der bei der Kalisalzverarbeitung vorkommenden Lösungen" (Zeitschrift Kali 1910, Heft 13 und 14, S. 280).

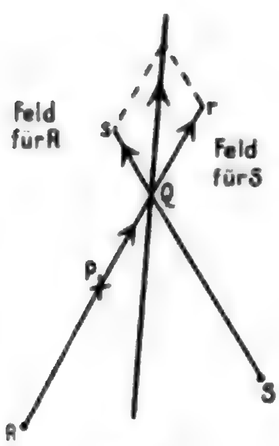


Fig. 9.

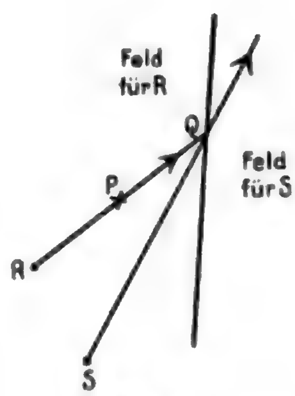


Fig. 10.

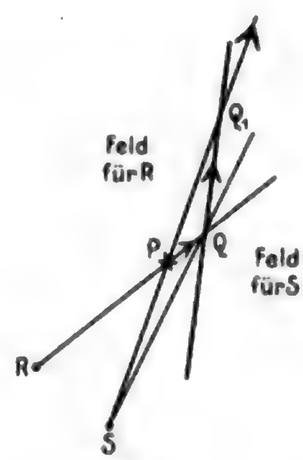


Fig. 11.

4g) Der Temperatureinfluß. Wie es schon der Vergleich der Figuren 7 und 8 ergibt, sind bei hoher Temperatur im allgemeinen wasserfreie und wasserarme Salze stabil (z. B. Langbeinit $K_2SO_4 . 2MgSO_4$ und Loeweit $Na_2SO_4 . MgSO_4 . 2\frac{1}{2}H_2O$), bei tiefer Temperatur dagegen höher hydratisierte (z. B. Schoenit $K_2SO_4 . MgSO_4 . 6H_2O$ und Astrakanit $Na_2SO_4 . MgSO_4 . 4H_2O$). Verfolgt man die Gleichgewichte bei zunehmender Temperatur, so müssen also die Bildungsfelder der wasserreichen Salze aus dem Diagramm verschwinden, diejenigen der wasserfreien oder wasserarmen neu auftreten und sich ausdehnen. Gleichzeitig ändert sich dabei das Zusammenstoßen der Bildungsfelder, also die Möglichkeit des Zusammenkristallisierens, der „Paragenese" zweier Bodenkörper. Die hier obwaltenden Verhältnisse wurden von van't Hoff nur qualitativ verfolgt, indem die Temperaturen des Verschwindens und Neuauftretens von Feldern und die Aenderung der Paragenesen festgestellt wurden. Für diese Bestimmungen wählte er schematische sogenannte paragenetische Darstellungen. Nachfolgend ist das Verschwinden des Schoenitfeldes bei 26° durch drei Figuren erläutert (Fig. 12, 13, 14).

Das ganze Temperaturgebiet zwischen 25 und 83° ließ sich in drei Perioden einteilen.

(Tabelle siehe nächste Seite oben.)

Das Vorkommen der Minerale in der Natur und ihre Paragenesen können an der Hand dieser Feststellungen als ein „geologisches Thermometer" herangezogen

Erste Periode: (25 bis 37°)	Fortfallen von	Schoenit $K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O$ bei 26°
	„ „	Reichardtit $MgSO_4.7H_2O$ bei 31°
	„ „	Magnesiumsulfathexahydrat bei 35,5°
Zweite Periode: (37 bis 55°)	Auftreten von	Langbeinit $K_2SO_4.2MgSO_4$ bei 37°
	„ „	Loeweit $Na_2SO_4.MgSO_4.2\frac{1}{2}H_2O$ bei 43°
	„ „	Vanthoffit $MgSO_4.3Na_2SO_4$ bei 46°
Dritte Periode: (55 bis 83°)	Fortfallen von	Astrakanit $Na_2SO_4.MgSO_4.4H_2O$ bei 60°
	„ „	Leonit $K_2SO_4.MgSO_4.4H_2O$ bei 61,5°
	„ „	Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$ bei 83°

werden, d. h. man kann aus diesem Vorkommen Schlüsse ziehen auf die Bildungstemperatur der Salzlagerstätten.

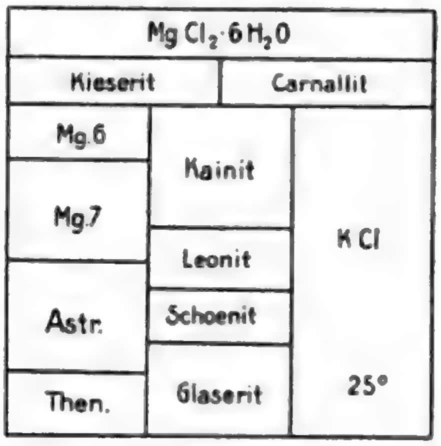


Fig. 12.

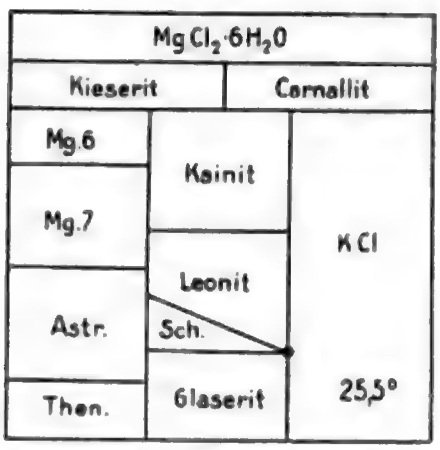


Fig. 13.

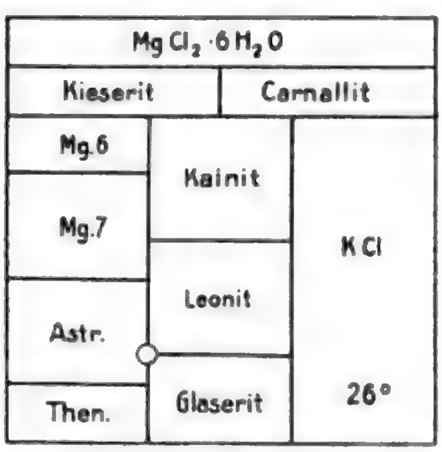


Fig. 14.

4h) Untersuchungsmethoden. Für die Festlegung der oben zusammengefaßten Tatsachen kamen im wesentlichen vier Methoden in Anwendung. Kristallisationsversuche, wobei die aus einer bestimmten Lösung bei der Verdunstung ausfallenden Bodenkörper mikroskopisch und chemisch untersucht wurden. Löslichkeitsversuche durch Schütteln von Wasser oder geeignet zusammengesetzten Lösungen mit den Bodenkörpern im Ueberschuß. Dilatometerversuche, die durch die Beobachtung der Volumänderung beim Erwärmen und Abkühlen eines bestimmten Gemisches auf die im Dilatometer (einem thermometerähnlichen Gefäß) vor sich gehenden Reaktionen schließen lassen. Tensimeterversuche, wobei die Dampfdrucke von Hydraten und Lösungen festgestellt werden; sobald ein Hydrat eine größere Dampftension besitzt als eine damit in Berührung stehende Lösung ist das Hydrat neben dieser Lösung instabil.

4i) Mitberücksichtigung des Kalziums. Die Gegenwart von Kalziumsalzen ändert die Gleichgewichte der Kalium-, Natrium- und Magnesiumsalze nur sehr wenig, sobald die Lösung, wie es bei natürlichen Prozessen durchwegs der Fall ist, schwefelsäurehaltig ist. Der Grund dieses Verhaltens liegt in der geringen Löslichkeit des Kalziumsulfats. Deshalb gelten die ausgezogenen Feldergrenzen in Figur 7 und 8 sowohl für Abwesenheit von Kalziumsalz wie für dessen Vorhandensein. Dagegen ist die Form, in welcher das Kalziumsalz neben der Lösung stabil ist, als einfaches bezw. hydratisches Sulfat oder als Doppelsalz, von dem Verhältnis der übrigen Komponenten in der Lösung abhängig. So ergeben sich die gestrichelten Feldergrenzen für die Kalziumsalze, die sich neben den anderen Bodenkörpern bei der Verdunstung ausscheiden. Besonders fällt die Vergrößerung des Polyhalitfeldes ($K_2SO_4.MgSO_4.2CaSO_4.2H_2O$) für die Temperatur von 83° im Vergleich zum Diagramm Figur 7 für 25° auf. Wie überhaupt die Verhältnisse bei der erstgenannten höheren Temperatur mit dem Naturvorkommen sehr viel besser übereinstimmen als die bei niederer Temperatur, so ist auch Polyhalit neben Anhydrit das gewöhnlichste Kalziummineral der Kalisalzlagerstätten.

Von besonderem Interesse war die Feststellung der Bildungsverhältnisse von Anhydrit $CaSO_4$ und Gips $CaSO_4\ 2H_2O$. Durch Tensimeterversuche stellte es sich heraus, daß Gips von 63,5° hinauf eine höhere Wasserdampfspannung besitzt als die an Kalziumsulfat gesättigte Lösung. Von 63,5° ab muß also Anhydrit an Stelle von Gips aus einer rein wässerigen Lösung ausfallen. Ist die Lösung jedoch an Steinsalz gesättigt, so verringert sich ihre Dampfspannung entsprechend und ist schon von 35° ab Anhydrit der stabile Bodenkörper. Aus einer am sehr löslichen Chlormagnesium gesättigten Lösung kann sogar bei gewöhnlicher Temperatur (etwa 15°) nur Anhydrit und kein Gips ausfallen. Vergleiche Figur 15, in welcher die

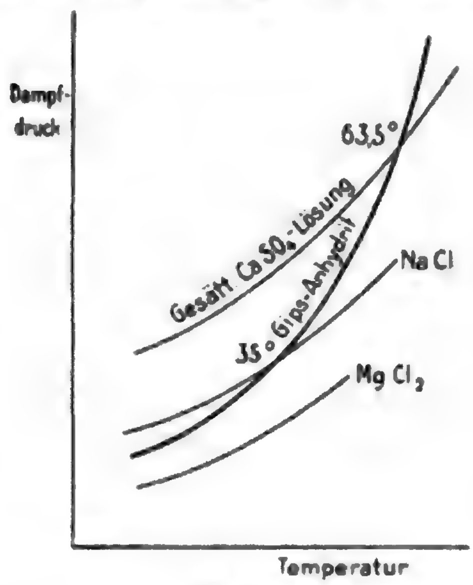


Fig. 15.

Dampfspannungskurve des Gipses stark ausgezogen ist. Diese Tatsachen erklären den Umstand, daß aus dem Zechsteinmeere mit seinem erhöhten Salzgehalt durchweg Anhydrit an Stelle von Gips ausgefallen ist. Dort wo der Anhydrit infolge der Gebirgsbildung zutage getreten ist (Rand des Harzes, des Kyffhäusergebirges), wandelte sich der Anhydrit nachträglich in Gips um.

5. Die Anwendung der van't Hoffschen Untersuchungen auf das Naturvorkommen. Wie es von vornherein zu erwarten war, stimmen die Ergebnisse der physikalisch-chemischen Gleichgewichtsuntersuchungen nur in großen Zügen mit den Verhältnissen in den natürlichen Salzlagerstätten überein. Erstens muß bei diesen natürlichen Ablagerungen oft eine ungleichmäßige Temperatur- und Stoffverteilung in den verschiedenen Schichten des Laugenbeckens vorhanden gewesen sein, dann die Zeit zur Gleichgewichtsbildung oft gefehlt haben, zweitens haben die Salze nach der Ablagerung in späteren geologischen Zeiten nachweislich noch bedeutende Aenderungen erfahren.

Einige auffallende Abweichungen zwischen den Laboratoriumsergebnissen und dem Naturvorkommen sind folgende:

1. In der Anhydritregion ist der Gehalt an $CaSO_4$ (ca. 4%) viel größer als der Löslichkeit des Kalziumsulfats entspricht. Das Anhydrithartsalz des Südharzbezirks mit seinem bis etwa 20% ansteigenden $CaSO_4$-Gehalt kann sicher nicht aus einer einheitlichen Lösung auskristallisiert sein. Für beide Fälle wird wohl ein Zuströmen von kalziumsulfathaltigem Wasser den hohen Anhydritgehalt verursacht haben.

2. In der Carnallitregion werden durchschnittlich 22% Steinsalz gefunden, während unter Gleichgewichtsbedingungen nur 2,3 bis 2,8% NaCl bei 25 bezw. 83° darin enthalten sein könnten, entsprechend der geringen Löslichkeit des Chlornatriums in einer stark chlormagnesiumhaltigen Lösung. Auch hier müssen Zuflüsse oder eine verschiedene Ablagerung aus verschiedenen Laugenschichten, welche nach dem Zusammensinken das jetzige bankige Salzgestein lieferte, zur Erklärung herangezogen werden.

3. Die verschiedenen Regionen gehen allmählich ineinander über, während die Kristallisationsbahn bei den synthetischen Versuchen eine diskontinuierliche, plötzliche Aenderung der Ausscheidungen verlangt. Schwankungen in der Temperatur, gewissermaßen Pulsationen um eine Gleichgewichtslage, erklären die mehr kontinuierlichen Uebergänge in der Natur.

Sieht man von derartigen Abweichungen ab, so stimmt die Reihenfolge der Ablagerungen an vielen Stellen mit der aus dem Diagramm für 83° ablesbaren Ausscheidungsfolge gut überein, wie die nachstehende Tabelle zeigt (vgl. O. Riedel, Zeitschrift für Kristallographie 1912 **50**, 154 bis 158).

Berlepschbergwerk, Staßfurt, 388 m Sohle, unmittelbar unter dem Salzton	Nach den van't Hoffschen Daten für eine nahezu mit dem jetzigen Meerwasser übereinstimmende Lauge (83°)
Vanthoffithalit	Vanthoffit + Steinsalz
Loeweithalit	Loeweit + Steinsalz
Langbeinithalit	Langbeinit + Steinsalz
Kieseritsylvinhalit	Langbeinit + Sylvin + Steinsalz
Kieseritischer Halitcarnallit	Kieserit + Sylvin + Steinsalz
(Grauer Salzton)	Carnallit + Kieserit + Steinsalz
	(Bischofit + Carnallit + Kieserit + Steinsalz).

Das Ergebnis der van't Hoffschen Untersuchungen, welches in geologischen Kreisen das lebhafteste Interesse hervorgerufen hat, ohne daß man bis jetzt zu einer allgemein befriedigenden Ansicht gelangt ist, besteht in der Tatsache, daß die Paragenese Steinsalz + Sylvin + Kieserit, das in den deszendenten Salzlagern weitverbreitete Hartsalz, erst bei einer Bildungstemperatur oberhalb 72° möglich ist. Unterhalb dieser Temperatur müßte sich Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$ bilden, der aber in den primären und deszendenten Lagerstätten durchaus fehlt. Zwar hat man in den jetzigen ungarischen Salzseen Temperaturen bis rund 70° gemessen, die Ursache dieser Eigentümlichkeit (Aufspeicherung der Sonnenwärme in den konzentrierten Laugenschichten in etwa 2 m Tiefe, welche Schichten sich infolge der Schwere mit der obersten schwach salzigen Lauge nicht vermischen[1])) kann jedoch für ausgedehnte, den Winden ausgesetzte Laugenbecken, wie sie uns die Zechsteinsalze geliefert haben, kaum angenommen werden. Schon der Badebetrieb in den erwähnten Salzseen zerstört die höchst interessante Treibhauswirkung. Ob tatsächlich das Postulat der hohen Temperatur (über 72°) für die natürliche Hartsalzbildung angenommen werden muß, läßt sich bis jetzt nicht entscheiden.

Für die posthume Bildung des Salzhuts gilt eine wesentlich niedrigere Temperatur, wie das reichliche Vorkommen von Schoenit $K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O$ mit der oberen Bildungstemperatur von 26° und von Reichardtit $MgSO_4.7H_2O$ (obere Bildungstemperatur 31°) in demselben beweisen.

6. Die wichtigsten Nebengemengteile der Kalisalzlagerstätten. Bor. Borate kommen weit verbreitet, obwohl nur in geringer Menge, in den Kalisalzlagern vor. Der Hauptvertreter dieser Borminerale ist der Borazit $MgCl_2.6MgO.8B_2O_3$, der sowohl in regulären Einzelkristallen von wenigen mm Durchmesser, als auch in einer dichten erdigen Ausbildung (Staßfurtit) und dann in Knollen bis etwa 15 cm Durchmesser, manchmal auch schichtförmig (Staßfurt) auftritt. Nur im Salzhut (vgl. Abschnitt 3) ist unter dem Einfluß der Sickerwässer auch der widerstandsfähige Borazit stellenweise in Pinnoit $MgB_2O_4.3H_2O$ und Kaliborit $KMg_2B_{11}O_{19}.9H_2O$ umgewandelt. Die Synthese der Salzlagerborate wurde in großen Zügen von van't Hoff durchgeführt, die kristallographischen Daten sammelte und ergänzte H. E. Boeke (Zentralbl. f. Mineral. 1910, S. 531 bis 539), während W. Biltz und E. Marcus (Zeitschr. f. Anorg. Chem. 1911, **72**, 302 bis 312) das Vorkommen von fein verteiltem Borat in den Salzen chemisch-analytisch bearbeiteten. Ein wichtiges Ergebnis der letzteren Arbeit war der Nachweis, daß Salze, die als Spaltenausfüllungen nachträglich gebildet wurden, borfrei sind und dadurch von primären und deszendenten Salzen unterschieden werden können.

Brom. Unter den Nebenbestandteilen der Kalisalzlager ist Brom der technisch wichtigste. Dieses Element kommt im Carnallitgestein zu etwa 0,15 bis 0,25% vor durch isomorphe Vertretung des Chlors im Carnallitmineral und ist ebenfalls im Sylvin des Hartsalzes und Sylvinits in Mengen von ca. 0,3% enthalten. Die Mischkristallbildung der Bromide und Chloride von Natrium, Kalium und Magnesium wurde von Boeke (Zeitschr. f. Kristall. 1908, **45**, 346 bis 391) erforscht und auch die natürliche Verteilung des Broms sowohl in vertikalem Sinne in der primären Staßfurter Ablagerung, wie auch horizontal in einer Reihe von Proben aus dem ganzen deutschen Kalisalzgebiete. Insbesondere wurde das später für viele Salzuntersuchungen benutzte, von F. Rinne zuerst ausgewählte und mit Meterzahlen versehene Normalprofil der primären Salzfolge im Berlepsch-Bergwerke zu Staßfurt zum ersten Male für die Untersuchung der Bromverteilung bearbeitet. In Figur 16 ist das 186 m lange Profil in bezug auf Carnallit und Bromführung abgebildet. Die Bromkurve zeigt eine deutliche Parallelität mit der Carnallitkurve. Das „Steinsalzmittel" zwischen 150 und ca. 180 m ist in der liegenden Partie sylvinhaltig und daher noch deutlich bromführend.

Bei der Feststellung der horizontalen Verteilung des Broms stellte es sich heraus, daß ein zentraler Bezirk (die Salzbergwerke Beendorf, Ehmen, Salzdetfurt, Eime, Alfeld, Freden) ein deutliches Maximum in der Bromführung des ganzen deutschen Kalisalzgebietes aufweist. Es wurde daraus auf ein Tiefenmaximum im salzausscheidenden Laugenbecken der Zechsteinzeit geschlossen, weil Brommagnesium sich an der Atmosphäre zersetzt und also in tiefen Laugenmassen am besten geschützt ist. Neuerdings hat H. Stille aus der allgemeinen Verteilung des Salzes im Hannoverschen Bezirke denselben Schluß auf ein Tiefenmaximum an dieser Stelle gezogen.

Jod. Während Brom in erheblicher Menge von den Chloriden der Salzlager isomorph aufgenommen wird, geht dem Jod die Fähigkeit ab, das Chlor in den Chloriden zu vertreten (Boeke, l. c.). Entsprechend fehlt das Jod in den Kalisalzlagerstätten, obgleich es im Meerwasser in nicht geringer Menge (ca. 2 mg im Liter, gegen ca. 65 mg Brom) vorhanden ist. Nur äußerst geringe Spuren von Jod

[1]) Vgl. M. Rozsa, Neuere Daten zur Kenntnis der warmen Salzseen. Berlin 1911.

konnte E. Erdmann (Zeitschr. f. angew. Chemie 1910, 23, 342) mit eigens dazu ersonnenen analytischen Methoden nachweisen (z. B. 0,42 mg in 10 kg Sylvin des Hartsalzes von Neu-Staßfurt; in 100 kg Carnallit sind weniger als 0,1 mg Jod vorhanden).

Ammoniak und Nitrat. Nach den Untersuchungen von Biltz und Marcus (Zeitschr. f. anorg. Chemie 1909, 62, 103 bis 202) kommt Ammonium als isomorphe Vertretung des Kaliums namentlich im Carnallitgestein der Salzlager vor (ca. 0,5 mg auf 10 g Salz). Nitrat konnte nur nachgewiesen werden in den mittleren Schichten des grauen Salztons, in welchen von E. Zimmermann (Monatsber. d. deutschen geol. Gesellsch. 1908, 56, 47) Versteinerungen, also Reste früheren organischen Lebens gefunden worden sind.

Rubidium, Cäsium, Lithium. Rubidium und Cäsium kommen in derselben Weise wie Ammonium vor (etwa 0,03% im Carnallitmineral, vgl. E. Wilke-Dörfurt, Zeitschr. Kali, 1912, 6, 245 bis 254) und werden aus den Endlaugen der Carnallitverarbeitung gewonnen. Lithium findet sich nur in den Laugeneinschlüssen angesammelt, wo es spektroskopisch leicht erkennbar ist.

Eisen. Ein wichtiger Nebengemengteil der Kalisalzlager ist das Eisen in verschiedenen mineralischen Formen und zwar als Eisenglanz Fe_2O_3, der durch einen Gehalt von nur 0,04% namentlich den Carnallit hochrot färbt, gelegentlich als schwarzfärbender Magnetit Fe_3O_4, als Pyrit FeS_2 in Einzelkristallen von einigen mm Durchmesser, als gelbfärbendes Eisenchlorid $FeCl_3$ in Flüssigkeitseinschlüssen, als isomorphe Vertretung des Magnesiums im Borazit und schließlich als Rinneit $FeCl_2 \cdot 3KCl \cdot NaCl$. Das letztere erst im Jahre 1908 entdeckte Tripelchlorid bildet besonders auf den Nordhäuser Kaliwerken zu Wolkramshausen linsenförmige Spaltenausfüllungen, die das reine Mineral kilogrammweise zu gewinnen gestatteten. Eine ausführliche Monographie über das Rinneitvorkommen und über die Eisensalze in den Kalisalzlagerstätten veröffentlichte H. E. Boeke im Neuen Jahrbuch für Mineralogie 1909 II, 19 bis 56 und 1911 I, 48 bis 76, wo auch die Paragenesen der einschlägigen Verbindungen experimentell-synthetisch festgelegt sind.

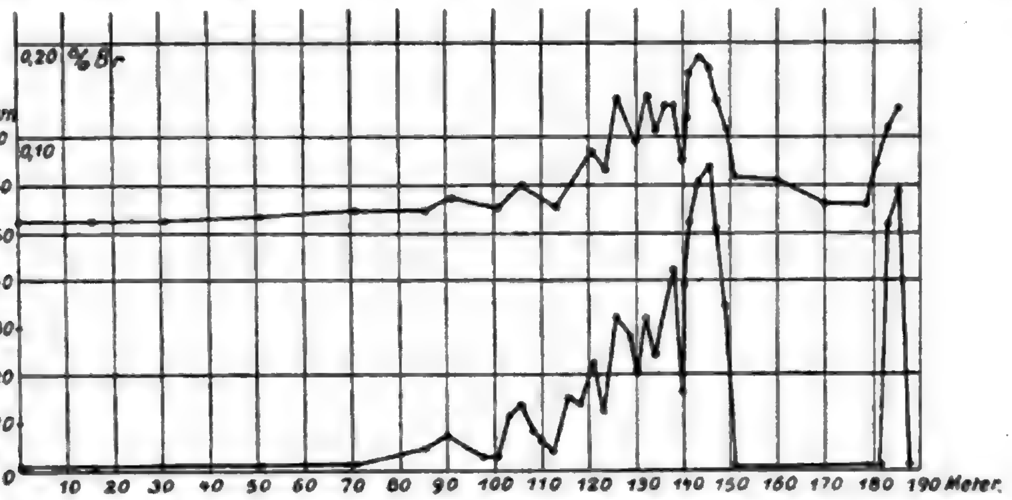


Fig. 16. Carnallit- und Bromgehalt im Normal-Profil des Berlepsch-Bergwerks, Staßfurt.

Kupfer, Silber und Gold. Kupfer kommt in kleinen Mengen (ca. 5 mg pro 1 kg Substanz) im grauen Salzton vor und ist auch in den tonigen Schnüren des Salzes angereichert, wahrscheinlich an beiden Stellen in sulfidischer Form (Biltz und Marcus, Z. f. anorg. Ch. 1909, 64, 236 bis 244). Das Kupfervorkommen im Salz bietet somit eine Analogie mit der Kupferführung des bekannten Kupferschieferflözes des unteren Zechsteins (ca. 2% Cu).

Die Prüfung auf Gold und Silber in den Kalisalzlagerstätten wurde mit besonders verfeinerten Methoden von K. Friedrich (Metallurgie 1906, 3, 627 bis 630) ausgeführt. Nur vereinzelt wurde im Carnallit und Salzton 12 bis 13 mg Gold pro t, im Staßfurter Steinsalz 34 mg Silber pro t gefunden.

Erdöl und Gase. In den Kalisalzen kommen nicht selten, wenn auch meist in geringer Quantität, Ausströmungen von Erdöl vor. Sie zeigen an verschiedenen Stellen recht verschiedene Eigenschaften und stimmen auch meist nicht mit sonst bekannten deutschen Erdölen überein (E. Graefe, Zentralbl. f. Mineral. 1910, 1 bis 4). Andere Vorkommnisse von Kohlenwasserstoffen, die wohl auf Spuren von organischem Leben in den Salzlaugen hindeuten, finden sich in den mikroskopischen Flüssigkeitseinschlüssen des Steinsalzes, wo dann oft zwei nicht mischbare Flüssigkeiten (stark lichtbrechen-

der, viskoser Kohlenwasserstoff und eine wässerige Lösung) sichtbar sind.

Von größerer Bedeutung als diese Erdölvorkommnisse sind die Gasausströmungen im Salz, die dort, wo es sich um brennbare Produkte handelt, oft jahrelang andauernde Flammen liefern. Neben untergeordneten Vorkommen von Schwefelwasserstoff und Stickstoff sind von besonderer Bedeutung: Grubengas und ähnliche Kohlenwasserstoffe, besonders im Hauptanhydrit oberhalb des Salztons, fernerhin auch im älteren Steinsalz; Wasserstoff nur in den Kalisalzlagern, hauptsächlich im Carnallit (wahrscheinlich bei der Bildung von Eisenglanz Fe_2O_3 aus Eisenchlorür $FeCl_2$ und Wasser entstanden); Kohlensäure auf den Lagerstätten des Werragebiets, wo das Salz infolge von Basaltdurchbrüchen mit dem Gase imprägniert ist. Sowohl gewaltige Ausströmungen, wie auch das Vorkommen in kleinen Einschlüssen des Salzes, das dann beim Auflösen knistert („Knistersalz"), legen von diesem Gasvorkommen Zeugnis ab.

Besonderes Interesse erregte der Befund von E. Erdmann (Ber. d. deutschen chem. Gesellsch. 1910, **43**, 777 bis 782), daß eine wesentlich aus Wasserstoff bestehende Gasausströmung vom Salzbergwerk Leopoldshall bei Güsten einen Gehalt von 0,17% Helium aufwies. Vielleicht steht dieses Heliumvorkommen mit der Radioaktivität des Kaliums in Beziehung, obgleich man beim Kalium bis jetzt keine α-Strahlung, folglich auch keine Heliumbildung unmittelbar nachweisen konnte (s. den Artikel „Radioaktivität").

7. Die Tektonik der Salzlagerstätten. Der geologische Bau der Kalisalzlager hat sich als besonders verwickelt herausgestellt. In den Salzgesteinen sind vielerorts Faltungserscheinungen zu beobachten, die sich im salzfreien Nebengestein nicht oder kaum bemerkbar machen. Die Ursache dieser Erscheinung ist hauptsächlich in der großen Plastizität der chloridischen Salzminerale (Steinsalz, Sylvin, Carnallit, Bischofit) begründet. So lassen sich Bischofitkristalle schon zwischen den Fingern deformieren und können Kristalle von Steinsalz und Sylvin durch Druck in ihrer Form verändert werden, ohne den Zusammenhang zu verlieren oder undurchsichtig zu werden. Temperaturerhöhung steigert die Plastizität des Steinsalzes so erheblich, daß längliche Spaltstücke dieses Minerals in der Bunsenflamme korkzieherartig gedrillt werden können (L. Milch, Neues Jahrbuch für Mineralogie 1909 I, 60 bis 72). Beim Carnallit äußert sich die Deformationsfähigkeit im Auftreten von Zwillingslamellen parallel den Flächen des Stammprismas (F. Rinne, von Koenen-Festschrift, Stuttgart 1907, S. 369 bis 376). Ein derart plastisches Verhalten der Salzminerale und infolgedessen der chloridischen Salzgesteine muß ein ganz anderes tektonisches Bild hervorrufen, als man es bei den sonstigen Sedimenten oder den Eruptivgesteinen zu sehen gewohnt ist. Von v. Koenen (Ueber Wirkungen des Gebirgsdruckes im Untergrunde in tiefen Salzbergwerken, Nachrichten d. K. Ges. d. Wiss. Göttingen 1905, 1 bis 18) wurde zuerst auf diese Eigentümlichkeit aufmerksam gemacht und seitdem wurden seine Beobachtungen ganz allgemein bestätigt.

Die Salze reagieren auf Gebirgsdruck oder lokale Druckerscheinungen (z. B. durch chemische Reaktionen im Salz, die mit Volumveränderung verknüpft sind) durch intensive Faltungen, während starre Einlagerungen, wie der Hauptanhydrit, dabei zerrissen werden. —

Im großen ganzen besteht der Staßfurter Salzbezirk aus einem Sattel, auf dessen Schenkeln die Kalisalze abgebaut werden, während der Scheitel so nahe an die Erdoberfläche gerückt ist, daß der „Salzspiegel" (das etwa 300 m unter der Tagesoberfläche liegende Niveau, über welchem die zirkulierenden Wässer das Salz aufgelöst haben) erreicht wurde und nur ein Trümmergestein aus Gips und Letten an Stelle des Salzes übrig blieb. Im Südharz und namentlich im Werra-Fuldagebiete dagegen ist eine regelmäßige, nahezu horizontale Lagerung des Salzes angetroffen worden.

Im Gegensatz zu den erstgenannten Provinzen zeigt sich der kalisalzreiche hannoversche Bezirk durch ganz außerordentliche Faltungsprozesse geologisch gestört. Oft können Liegendes und Hangendes nicht unterschieden werden. Der Grund dieses Verhaltens ist im Salzreichtum selbst zu suchen. Allgemein hat man beobachtet, daß mächtige Sedimentablagerungen auch starke Faltungsvorgänge aufweisen. Wie im „Norddeutschen Becken" (nördlich der Linie Teutoburgerwald-Solling-Harz) die mesozoischen Schichtenkomplexe eine bedeutende Mächtigkeit aufweisen, so fand hier auch schon in der Zechsteinzeit eine sehr reichliche Salzsedimentation statt. Besonders durch die zahlreichen Arbeiten von H. Stille wurde die tektonische Gliederung dieses Gebiets entziffert.

Als eine weitere Folge der Plastizität des Salzes ist das auffallende pfropfenartige Vorkommen von Steinsalzgesteinen zu erwähnen, wie es in Figur 17 im Profil und im Grundriß dargestellt ist (Rhang-el-Melah, Algier, nach R. Lachmann). Das Steinsalz ist durch jüngere Schichten emporgedrungen und tritt an der Erdoberfläche mit nahezu rundem Querschnitt aus. Diese eigentümliche Gebirgsbildung beim Steinsalz wurde schon vor vielen Jahrzehnten beschrieben und ist neuerdings von Lachmann (Kali 1911, Heft 8, 9, 22, 23 und 24) eingehend behandelt

worden. Stille machte darauf aufmerksam, daß die Salzpfropfen meist an tektonische

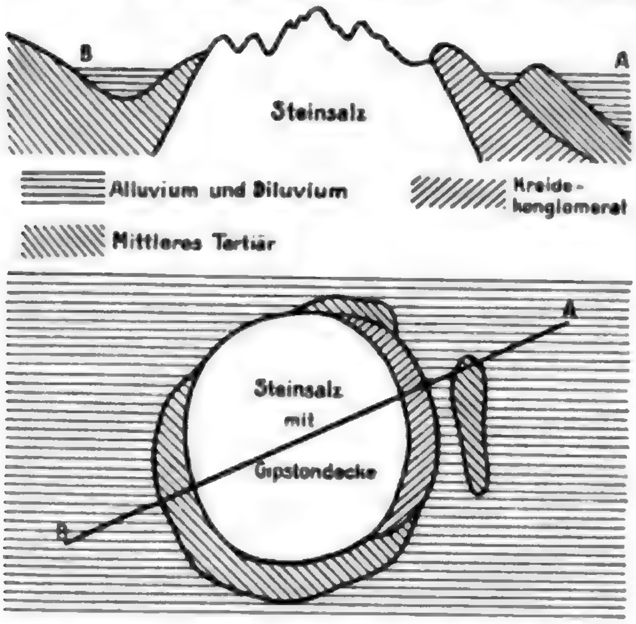


Fig. 17. Steinsalzvorkommen von Rhang-el-Melah, Algier. Im Profil und im Grundriß. Nach R. Lachmann.

Linien gebunden sind. Die Erklärung des Vorkommens ist darin zu suchen, daß das plastische Salz infolge des Gewichts der überlagernden Schichten oder des Gebirgsdrucks an der schwächsten Stelle des Deckgebirges emporgepreßt ist, genau so wie Farbe aus einer Tube oder zähe Lavenmassen bei ruhig verlaufender vulkanischer Tätigkeit an der Stelle geringsten Widerstandes hervorquellen (vgl. die 300 m hohe „Nadel" des Mont Pelée auf Martinique).

Welche Veränderungen die Kalisalzlagerstätten bei der Ueberlagerung durch jüngere Sedimentschichten in einer Mächtigkeit von stellenweise mehreren 1000 m, und der daraus hervorgehenden Temperaturerhöhung (ca. 3° pro 100 m Tiefe) erlitten haben, ist eine Frage, deren Bearbeitung erst angefangen hat. Ein abschließendes Urteil kann darüber noch keineswegs ausgesprochen werden. Mehrere chemische Reaktionen im Salz bei hoher Temperatur sind nach den van't Hoffschen Ergebnissen wahrscheinlich; die wichtigsten derselben sind

Magnesiumsulfathexahydrat ⟶ Kieserit + H_2O (35,5°),
Leonit + Kieserit ⟶ Langbeinit + H_2O (37°),
Gips ⟶ Anhydrit + H_2O (63,5°),
Kainit ⟶ Kieserit + Sylvin + H_2O (72° in Gegenwart von Carnallit, sonst 83°)

(vgl. H. E. Boeke, Uebersicht der Mineralogie usw. der Kalisalzlagerstätten S. 50). Zwar wird die Temperatur dieser mit Volumvergrößerung verknüpften Reaktionen bei zunehmendem Druck erhöht. So wurde von van't Hoff (Ozeanische Salzablagerungen I, S. 66) die Temperaturerhöhung der Reaktion

$$2\,MgCl_2.6H_2O + CaCl_2.6H_2O \xrightarrow{22^\circ} CaCl_2.2MgCl_2.12H_2O \text{ (Tachhydrit)} + 6H_2O$$

auf 0,016° pro Atm. bestimmt. Die Temperaturzunahme in der Erdrinde ist jedoch wesentlich höher (0,12° pro 4 m Gestein also pro 1 Atm.). Der Hangenddruck konnte also die mit Wasserabgabe verknüpften Reaktionen im allgemeinen nicht verhindern.

8. Die Verarbeitung der Kalisalze. Die Verwendung der Kalisalze als ein hervorragendes Düngemittel (neben Phosphat und Nitrat) ist bekannt. Hierzu wird jedoch nur ziemlich selten das natürliche Salz unmittelbar in den Handel gebracht. Namentlich der Steinsalz- und Magnesiumgehalt ist wertlos für Düngezwecke und meist sind die Frachtkosten für die unwirksamen Beimischungen des Kalisalzes höher als die Kosten einer vorhergehenden chemischen Trennung. Die hierbei angewandten Prozesse richten sich nach der Natur des gewonnenen Salzgesteins und sind hauptsächlich dreierlei Art:

a) Chlorkaliumgewinnung aus Carnallit (und Hartsalz z. T.),

b) Chlorkaliumgewinnung aus Sylvinit,

c) Kaliummagnesiumsulfat- und Kaliumsulfatdarstellung.

Außerdem spielt die Gewinnung von Glaubersalz $Na_2SO_4.10H_2O$, Chlormagnesium, Bittersalz $MgSO_4$ $7H_2O$, Brom und Boraten als Nebenprodukten eine Rolle.

8a) Chlorkaliumgewinnung aus Carnallit. Das aus Carnallit, Steinsalz und Kieserit bestehende Salzgestein wird kurze Zeit mit einer heißen Chlormagnesiumlösung in Berührung gebracht, wodurch Carnallit in Lösung geht. Kieserit und Steinsalz fast völlig ungelöst zurückbleiben. Die Lösung wird (nach 1 bis 2stündigem Verweilen in Klärkästen) in großen eisernen Kristallisierkästen der langsamen Abkühlung überlassen; entsprechend dem Diagramm Figur 5 kristallisiert dabei nur Chlorkalium aus, bis der ursprüngliche Gehalt von ca 12% KCl auf 3,5% gesunken, der Chlormagnesiumgehalt gleichzeitig von 17,8% auf 21 bis 22% gestiegen ist. Das hauptsächlich mit Chlornatrium verunreinigte Chlorkalium wird abfiltriert, durch „Decken" mit Wasser noch weiter gereinigt und dann getrocknet. Bei weiterem Eindampfen fällt aus der chlormagnesiumreichen Mutterlauge (künstlicher)

Carnallit aus, der neuem Rohcarnallit zugefügt wird.

Die nach der Carnallitkristallisation übrigbleibende Endlauge muß in die Flüsse abgelassen werden. Dieser Uebelstand hat zu vielen gerichtlichen Verhandlungen Anlaß gegeben und hat zur Folge, daß, wenn möglich, nicht Carnallitgesteine, sondern Hartsalze und Sylvinite (die bei der Verarbeitung keine Endlaugen liefern) gewonnen und verarbeitet werden. Ein kleiner Teil der Endlaugen wird zu festem Chlormagnesium eingekocht, ein anderer Teil dient zur Gewinnung des ca. 0,3 % betragenden Bromgehalts, indem letzteres mit Chlor freigemacht wird und dann flüssig oder an Eisen gebunden in den Handel kommt.

Stark kieserit- (oder anhydrit-)haltige Hartsalze werden mit unwesentlichen technischen Aenderungen, ebenso wie Carnallit verarbeitet. Bei den schwach kieserit- und anhydrithaltigen Sylviniten dagegen kommt ein einfacheres Verfahren zur Anwendung.

8b) Chlorkaliumgewinnung aus Sylvinit. Als Grundlage dieses Prozesses dient der schon in Abschnitt 4 erwähnte Umstand, daß eine heißgesättigte Lösung von Chlorkalium und Chlornatrium bei der Abkühlung nur Chlorkalium ausfallen läßt. Die abgekühlte Lösung kann also nach dem erneuten Erhitzen immer wieder zur Auflösung von Sylvin benutzt werden. Ein allmählich zu stark ansteigender Magnesiumsulfatgehalt wird durch Zusatz von Kalk, der Magnesiumhydroxyd und Gips ausfällt, entfernt. Der große Vorzug dieses Verfahrens besteht also darin, daß keine Abwässer erzeugt werden.

8c) Kaliummagnesiumsulfat- und Kaliumsulfatdarstellung. Verwickelter und auch der weiteren Verbesserung noch wohl fähig ist die Darstellung von Kaliummagnesiumsulfat (technisch Kalimagnesia) und Kaliumsulfat aus reichlich sulfathaltigen Salzgesteinen. Als Ausgangspunkt dient entweder natürlicher Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$, Schoenit $K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O$ oder Langbeinit $K_2SO_4.2MgSO_4$. Auch wird in letzter Zeit zur Sulfatbereitung häufig künstliches Chlorkalium und Bittersalz benutzt.

Kainit geht durch Umkristallisation in der Kälte in Schoenit über, während Chlormagnesium in Lösung geht:

$$2(KCl.MgSO_4.3H_2O) = K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O + MgCl_2.$$

Bei der Umkristallisation des Kainits in der Hitze unter 2 bis 4 Atm. Druck bildet sich ein langbeinitähnliches Produkt.

Die Umsetzung von Chlorkalium und Bittersalz bei ca. 30° führt wiederum zu künstlichem Schoenit:

$$2(MgSO_4.7H_2O) + 2KCl = K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O + MgCl_2 + 8H_2O.$$

Will man das Kaliummagnesiumsulfat weiter in Kaliumsulfat überführen, so wird der künstliche Schoenit bei einer Temperatur von 60 bis 70° mit zwei weiteren Molekülen Chlorkalium behandelt:

$$K_2SO_4.MgSO_4.6H_2O + 2KCl = 2K_2SO_4 + MgCl_2 + 6H_2O.$$

Es hat sich in der Technik als zweckmäßig erwiesen, auch bei der Kaliumsulfatdarstellung immer Kalimagnesia als Zwischenprodukt abzuscheiden, obgleich theoretisch die Einwirkung der doppelten Menge Chlorkalium auf Bittersalz gleich Kaliumsulfat liefern müßte.

Eine Anwendung der van't Hoffschen Ergebnisse auf die Kalisalzverarbeitung, die namentlich bei der Sulfatdarstellung von Interesse werden dürfte, gab H. E. Boeke, Zeitschrift Kali 1910, Heft 13 und 14, an.

Literatur. *Neuere zusammenfassende Schriften über die deutschen Kalisalzlagerstätten sind:* ***H. Precht****, Die norddeutsche Kaliindustrie, 7. Aufl., besorgt von R. Ehrhardt. Staßfurt 1907. — Deutschlands Kalibergbau, Festschrift zum 10. allgemeinen deutschen Bergmannstage zu Eisenach. Berlin 1907. Darin besonders wichtig:* ***H. Everding****, Zur Geologie der deutschen Zechsteinsalze, und* ***E. Erdmann****, Die Chemie und Industrie der Kalisalze. —* ***H. E. Boeke****, Uebersicht der Mineralogie, Petrographie und Geologie der Kalisalzlagerstätten. Berlin 1910. — Ein ausführliches Literaturverzeichnis (von 1600 bis 1907) von* ***E. Zimmermann*** *findet sich in der oben zitierten Festschrift, eine neuere (nicht ganz vollständige) bei* ***R. Görgey****, Die Entwickelung der Lehre von den Salzlagerstätten, Geologische Rundschau 1911,* **2**, *278. — Für die technische Verarbeitung der Kalisalze:* ***W. Kubierschky****. Die deutsche Kaliindustrie Halle a. S. 1907. —* ***E. Erdmann****, siehe oben. —* ***R. Lachmann****, Der Salzauftrieb. Halle a. S., 1911.*

H. E. Boeke.

Same

siehe den Artikel „Frucht und Same".

Sandkrater.

Sandkrater entstehen infolge Auspressens von Gasen in sandigen Gebieten bei Erdbeben. Es sind am oberen Ende durchlöcherte flache Sandhügel (vgl. auch „Schlammvulkane"). Weiter vgl. den Artikel „Erdbeben".

Saporta

Gaston Marquis de

Geboren am 23. Juli 1826 in St.-Zacharie (Departement Var). Nachdem er anfangs die militärische Laufbahn ergriffen hatte, widmete er sich dem Studium der Botanik. Besondere Verdienste hat er sich durch seine zahlreichen Arbeiten im Gebiet der Pflanzenpaläontologie erworben. 1876 wurde er zum korrespondierenden Mitglied der Akademie der Wissenschaften in Paris erwählt. Er starb am 26. Januar 1895 zu Aix-en-Provence.

Literatur. *R. Zeiller, in der Révue générale de Botanique, Bd. VII (1895), S. 353 bis 388 (dort ein Schriftenverzeichnis).*

W. Ruhland.

Sapropel

= Faulschlamm (vgl. den Artikel „Kohlen“).

Saprophyten.

1. Begriffsbestimmung. Holo- und Hemisaprophyten. Abgrenzung gegen Autotrophie und Parasitismus. Saprophytismus ein ökologischer Begriff. 2. Die einzelnen Fälle von pflanzlichem Saprophytismus. a) Saprophytische Schleimpilze, b) Bakterien, c) Spaltalgen, d) Flagellaten, e) Peridineen, f) Diatomeen, g) Algen, h) Pilze, i) Moose. k) Farnpflanzen, l) Blütenpflanzen.

1. Begriffsbestimmung und Abgrenzung. Als saprophytische oder saprotrophe Pflanzen bezeichnet man diejenigen Gewächse, welche die Kohlenstoffverbindungen, die sie zu ihrem Leben benötigen, nicht, wie autotrophe Pflanzen, aus Kohlendioxyd aufbauen und welche auch nicht, wie die Parasiten anderen Lebewesen organische Nährstoffe oder doch Wasser und Nährsalze entziehen, sondern welche auf totem organischen Material wachsen und von den in diesem enthaltenen organischen Kohlenstoffverbindungen leben. Sie gehören also zur ernährungsphysiologischen Gruppe der heterotrophen Pflanzen.

Mannigfache Uebergange vermitteln zwischen Saprophyten, Autophyten und Parasiten. Bindeglieder zwischen autotrophen und saprotrophen Gewächsen sind diejenigen Pflanzen, welche zwar Chlorophyll oder analoge Farbstoffe ausbilden und zur Assimilation des Kohlendioxyds befähigt sind, gleichwohl aber einen Teil der Kohlenstoffverbindungen, die sie in ihrem Stoffwechsel verwerten, aus vorgebildetem, leblosem organischen Material beziehen. Solche Pflanzen nennt man Hemisaprophyten, ihre Lebensweise Mixotrophie. Hierher gehören viele Flagellaten, blaugrüne und andere Algen, sodann unter den Blütenpflanzen z. B. die chlorophyllhaltigen Pirolaceen, Ericaceen und Orchideen. Auch Bakterien, welche zu autotrophem Leben befähigt sind, können unter Umständen als Hemisaprophyten gedeihen, so die wasserstoffoxydierenden Bakterien, wenn ihnen neben diesem Gas und Kohlendioxyd auch organische Nährstoffe geboten werden (vgl. den Artikel „Bakterien, Physiologie der Bakterien“). Holosaprophyten sind im Gegensatz dazu diejenigen Pflanzen, die ihren gesamten Kohlenstoffbedarf aus toten organischen Verbindungen decken.

Bezeichnet man also Formen, welche halb saprophytisch, halb autophytisch leben, als Halbsaprophyten, so ist zu beachten — man mag darüber im Artikel „Parasiten“ nachlesen —, daß man mit dem gleichen Namen auch Zwischenstufen zwischen Saprophyten und Parasiten bezeichnet, nämlich jene Pilze und Bakterien, welche andere Lebewesen befallen, schädigen und töten und dann von den abgetöteten Zellen und Geweben ihrer Opfer zehren (z. B. Botrytis).

„Saprophyt“ wird abgeleitet von σαπρός, faul, und so werden wir denn als Saprophyten in erster Linie solche Pflanzen bezeichnen, welche Fäulnis, Verwesung, Vermoderung bewirken und von den verschiedenen Zwischenprodukten dieser Vorgänge leben: Fäulnisbakterien in tierischen Leichen, Pilze, welche Laub und andere pflanzliche Abfälle im humusreichen Waldesboden zersetzen, Abwässerpilze, welche für Zerstörung der organischen Materie in verunreinigten Wässern sorgen, aber auch jene chlorophyllfreien oder -armen Blütenpflanzen des Waldbodens wie Fichtenspargel oder Nestwurz, obwohl diese weniger für den Kreislauf der Stoffe auf der Erde bedeuten, als saprophytische Pilze. Aber begreiflicherweise sind diese Saprophyten im engeren Sinn durch gleitende Uebergänge verbunden mit anderen heterotrophen Pflanzen, z. B. den Gärungserregern, wie Alkoholhefen, Milchsäurebakterien, die gewöhnlich auch den Saprophyten zugesellt werden.

Zu beachten ist besonders, daß die Bezeichnung Saprophyt eine vorwiegend ökologische ist und das Verhalten der Pflanzen an den natürlichen Standorten kennzeichnen soll, weniger diejenigen Befähigungen, welche physiologische Experimentierkunst ermittelt. Der Experimentalphysiologe kann Pflanzen, die in der Natur ausschließlich an solchen Standorten, welche ihnen nur mineralische Nährstoffe darbieten, im Kampf ums Dasein bestehen können, mit organischen Stoffen der verschiedensten Art, Kohlehydraten, organischen Stickstoffverbindungen usw., erfolgreich ernähren, gleichwohl wird man solche Pflanzen

nicht als Saprophyten bezeichnen, sondern ausschließlich nach ihrem Verhalten am natürlichen Standort als Autophyten charakterisieren.

Hiernach sind auch die Ausdrücke obligatorische und fakultative Saprophyten ohne Schwierigkeiten verständlich. Erstere sind diejenigen, welche in natura stets als Saprophyten auftreten; fakultative Saprophyten aber sind solche, welche an ihren natürlichen Standorten gelegentlich saprophytischem, mit Vorliebe parasitischem Lebenswandel huldigen, oder aber solche, die gelegentlich saprophytisch, meistens aber autophytisch sich ernähren.

2. Die einzelnen Fälle von pflanzlichem Saprophytismus. Wir wollen jetzt einige der wichtigeren Fälle von pflanzlichem Saprophytismus besprechen:

2a) Schleimpilze. Diese umfassen Saprophyten, welche mit ihren Plasmodien in altem Laub, Holz, Lohe usw. umherkriechen und die in diesen ihren Substraten enthaltenen Nährstoffe, nachdem sie dieselben nötigenfalls vorher durch ausgeschiedene Enzyme in Lösung überführt haben, in gelöster Form sich aneignen, oder nach tierischer Art sich ernährend, feste Brocken in ihr Inneres aufnehmen und soweit sie verdaulich sind, zu ihrer Ernährung verwenden. Anklänge an Parasitismus finden sich insofern, als auch lebendige Pilze befallen, Bakterien aufgenommen und über kurz oder lang getötet und verdaut werden.

2b) Bakterien. Bei den Bakterien treffen wir autophytische, saprophytische und parasitische Arten an. Von den erstgenannten können manche, so die eingangs erwähnten Wasserstoffbakterien, auch saprophytisch leben, und gleiches gilt von der Mehrzahl der parasitischen Bakterien. Die ungeheure Individuenzahl, in der Bakterien auftreten, ihre Widerstandskraft gegen schädliche Einflüsse, die Verschiedenheit ihrer Ansprüche an die Ernährungsweise, die bewirkt, daß an fast allen Orten, wo überhaupt Leben herrschen kann, sich diese oder jene Bakterienarten anzusiedeln vermögen, die so verschiedenartige Anpassung der einzelnen Arten an die Konzentration des Sauerstoffs und an die Temperatur haben zur Folge, daß die Bakterien zu den für den Kreislauf der Stoffe wichtigsten Saprophyten gehören, die in gleichzeitiger Tätigkeit oder metabiotischer Aufeinanderfolge organische Stoffe verwerten und zerstören. In Tier- und Pflanzenleichen, auf Mist und sonstigen Abfällen, im Erdboden, zumal wenn er nicht zu sauer reagiert und reich an Nährstoffen ist, z. B. im gut gedüngten Ackerboden, entfaltet sich ein reiches Bakterienleben. Aus der Bakterienflora in Abwässern kann man Rückschlüsse auf den Reinheitsgrad des Wassers machen. Viele Bakterien mit hervorstechenden Befähigungen, z. B. dem Vermögen, den freien Stickstoff zu binden, sind heterotrophe, d. h. saprophytisch lebende Wesen. Näheres mag man im Artikel „Bakterien, Physiologie der Bakterien“, nachlesen.

2c) Spaltalgen. Zweifellos kommen neben solchen Arten, die in reinem Wasser autotroph leben, auch andere vor, die in verunreinigten Wässern von organischen Stoffen zehren, also hemisaprophytisch wachsen. Aus dem bloßen Vorkommen in Schmutzwässern darf allerdings noch nicht darauf geschlossen werden, da es möglich ist, daß sie an solchen Stellen hauptsächlich wegen des verminderten Konkurrenzkampfes mit Algen, die reines Wasser bewohnen, gut gedeihen. Welcherlei organische Stoffe von ihnen aufgenommen werden, darüber ist noch nicht viel bekannt, einige Versuche zeigen an, daß sie verschiedene Kohlehydrate verwerten können. — In bestimmten Fällen schwindet der blaugrüne Farbstoff bei organischer Ernährung. — Ueber den Stoffwechsel der in Lemna, Lebermoosen und Azolla endophytisch lebenden blaugrünen Algen ist nichts Näheres bekannt.

2d) Flagellaten. Die Flagellaten führen zum großen Teil ein saprophytisches Leben und zwar finden wir sowohl holosaprophytische als auch hemisaprophytische Formen. Ganz besonders interessant ist es, daß bestimmte Arten je nach den Ernährungsbedingungen entweder chlorophyllhaltig oder farblos vorkommen können.

Am genauesten studiert ist in dieser Hinsicht von Zumstein und Ternetz Euglena gracilis. Die normale grüne Form dieser Art lebt in rein mineralischen Nährlösungen autotroph, vermehrt sich dann aber nur träge. Wird sie in organischen, eiweißhaltigen Lösungen am Licht gezüchtet, so wächst sie sehr freudig als Hemisaprophyt. In solchen Lösungen ins Dunkle gestellt, verliert sie ihr Chlorophyll, wird also bis auf den Augenfleck farblos und enthält Leuko- statt Chloroplasten; ins Licht zurückgebracht, ergrünt sie wieder; es handelt sich also um zwei Standortsmodifikationen. Eigenartigerweise treten aber auch in belichteten Kulturen „sprungweise“ einzelne farblose Individuen auf, die fürderhin farblos bleiben, keinen Augenfleck und keine Leukoplasten mehr führen und nur noch in organischen Lösungen weiter gezüchtet werden können. Sodann gibt es noch eine spontan in Eiweißlösungen auftretende sogenannte „Zwischenform“, die chlorophyllfrei ist, aber Leukoplasten und den Augenfleck besitzt und nach einiger Zeit in normale grüne Individuen und in konstant farblos bleibende aufspaltet.

2e) Dinoflagellaten. Auch bei den Dinoflagellaten oder Peridineen vermissen wir Holosaprophyten nicht, die durch den Mangel des braunen Farbstoffes in ihren Chromatophoren diese Ernährungsweise verraten. Gymnodinium hyalinum kann sich

amöboid umwandeln und in diesem Zustand kleine Algen verschlingen, also tierische Nahrungsaufnahme zeigen. Gymnodinium fucorum ist eine andere holosaprophytische oder fast farblose Form, deren Reinkultur auf Blasentangextrakt Küster gelang. — Viele braungefärbte Arten sind zweifellos zum Hemisaprophytismus befähigt.

2f) Diatomeen. Nitzschia putrida und leucosigma sind zwei farblose, holosaprophytische Arten, deren erstere, in Reinkultur untersucht, die verschiedensten organischen Verbindungen verwerten kann. Von stickstoffhaltigen Verbindungen erwies sich in erster Linie Leucin, aber auch Pepton als sehr günstig, von stickstofffreien Stoffen das Inulin. — Farbstoffführende Diatomeen können nach Richter und Meinhold (Nitzschia palea und dissipata, Navicula minuscula) autotroph üppig gedeihen, aber auch, allerdings nur falls sie am Licht gezüchtet wurden, verschiedene organische Verbindungen, Lennin, Asparagin, Inulin, Mannit, Aepfelsäure usw., wohl verwerten. Eine Reduktion der Chromatophoren, wie sie Karsten fand, tritt dabei nach Richter nur in verunreinigten Kulturen als Folge einer Schädigung durch Bakterien, nach Meinhold auch in Reinkulturen ein.

2g) Algen. Manche Volvocineen sind farblose Holosaprophyten. — Von den Konjugaten, Heteroconten, Chloro-, Phaeo- und Rhodophyceen sind nur einige nachher noch zu nennende Chlorophyceen auf ihr Vermögen zum hemisaprophytischen Leben exakt untersucht worden, darum kann über den etwaigen Saprophytismus der anderen kaum etwas gesagt werden. Die Beobachtung des Vorkommens der Algen im Freien lehrt, daß viele derselben streng an reines Wasser gebunden sind und darum jedenfalls in natura autotroph am besten gedeihen, während andere auch in Schmutzwasser, z. B. verunreinigten Häfen, üppig wachsen, so Ulva, Enteromorpha u. a.

In Reinkultur (Literatur bei Richter) wurden viele Volvocales, Protococcales (Chlorella, Scenedesmus), Ulotrichales (Stichococcus, Pleurococcus) gezüchtet und dabei zeigte sich, daß sie bei Zufuhr organischer Stoffe im Dunkeln gut gedeihen. In vielen Fällen wachsen sie in Kultur bei hemisaprophytischem Leben am üppigsten. Von den organischen Stoffen wirken die verschiedenen Zuckerarten oder Pepton, Asparagin, sehr günstig, die Volvocales bevorzugen Glycerin, sehr viele Arten gedeihen im Dunkeln üppig bei Zufuhr organischer Säuren. Bei Ernährung mit bestimmten organischen Stoffen bilden diese Formen auch im Dunkeln ihr Chlorophyll aus, während sie bei Zufuhr anderer organischer Stoffe im Dunkeln blaß oder farblos wachsen, z. B. Chlorella, Chlorothecium. Stichococcus bacillaris wächst gleichfalls bei Ernährung mit bestimmten organischen Stoffen im Dunkeln farblos, nach Zufuhr geeigneter anderer Stoffe oder nach Ueberführung ans Licht aber lebhaft grün.

Inwieweit die nach obigen Versuchen sicher vorhandene Befähigung unserer Grünalgen, organische Stoffe zu verarbeiten, sich an natürlichen Standorten betätigt, muß zweifelhaft bleiben. Die gute Eignung organischer Säuren hat für viele Algen vielleicht noch am ehesten ökologische Bedeutung, da solche Säuren häufig als Zwischen- oder Endprodukte des Stoffwechsels von Bakterien und Pilzen auftreten. Nun hatte aber Beijerinck schon früher die Meinung ausgesprochen, daß es sogar obligatorische Saprophyten unter den genannten Grünalgen gebe, sogenannte Peptonkohlenstoffalgen, welche außer Kohlensäure oder anderen stickstofffreien Kohlenstoffquellen noch Pepton unbedingt nötig hätten. Zu diesen sollte Chlorella, Scenedesmus, auch die Alge Cystococcus humicola, wenn sie als Flechtenalge lebt, gehören, und es war von Artari die Meinung verfochten worden, daß diese Form in zwei morphologisch gleichen ernährungsphysiologischen Rassen vorkomme, einmal in der Flechte als Peptonkohlenstoffalge, sodann im freilebenden Zustand, in welchem sie keine Vorliebe für organische Stoffe zeigen soll. Neue Untersuchungen Treboux's haben aber diese Behauptungen widerlegt: Cystococcus, aus der Flechte isoliert, zeigt weder gestaltliche, noch ernährungsphysiologische Differenzen gegenüber der freilebenden Form und es ist sehr möglich, daß es obligatorische Peptonkohlenstoffalgen gar nicht gibt. Jedenfalls gedeihen manche der früher dazu gerechneten Arten mit anorganischen Stickstoffquellen besser als bei Zufuhr von Pepton.

Zu den soeben behandelten Algen und Flagellaten gehören auch die wichtigsten Planktonpflanzen, die in Seen und im Meer als Urnahrung für die Seetiere von Bedeutung sind. Ebenso wie für Tiere des Planktons hat man nun auch für die Planktonpflanzen die Frage aufgeworfen, inwieweit sie von bestimmten organischen, im Meerwasser nachweislich gelösten Stoffen leben und durch diese organische Zukost zu ihrer eigentlichen Aufgabe, der Assimilation der Kohlensäure im Licht, in erhöhtem Maße befähigt werden. Spruchreif ist diese Frage nach dem Ausmaß eines etwaigen Hemisaprophytismus der Planktonpflanzen noch nicht (Literatur bei Lohmann).

Abgesehen von den Bakterien finden wir die wichtigsten holosaprophytischen Gewächse unter den Pilzen.

2h) Pilze. Zu den Saprolegniaceen gehören bekannte saprophytische Wasserpilze, welche auf im Wasser liegenden Leichen von Tieren und Pflanzen, auch auf lebenden Fischen vorkommen. Der dem Abwässerbiologen vertraute Leptomitus lacteus, neben Fadenbakterien und einigen

anderen Pilzen einer der wichtigsten Abwässerpilze, gehört ebenfalls hierher. Auch Vertreter der zweiten Gruppe der Algenpilze, Mucorarten, werden an solchen Standorten gefunden, doch sind diese in der übergroßen Mehrzahl dem Leben auf dem Land angepaßt und besiedeln mit Vorliebe Mist und andere Abfälle.

Unter den Schlauchpilzen haben wir zwar viele Parasiten, abgesehen von diesen aber die verschiedensten Saprophyten. So vor allem die bekanntesten Schimmelpilze, wie Penicillium und andere Aspergillaceen. Ferner die Kernpilze, soweit sie nicht parasitieren, und die Scheibenpilze, die auf humusreichem Waldesboden, altem Holz, weniger auf Tierleichen vorkommen. Unter den Basidiomyceten treffen wir endlich in den Hymenomyceten, sodann in den Bauchpilzen die vielleicht bekannteste Formation saprophytischer Pflanzen an, die mit ihren Mycelien den Humus durchziehen und mit ihren Fruchtkörpern den Waldesboden zur Herbstzeit zieren.

Die Ernährungsphysiologie der saprophytischen Pilze ist ein sehr gut durchgearbeitetes Gebiet und es ist unmöglich, hier viele Einzelheiten zu bringen. Sind auch die Pilze nicht im gleichen Umfang wie die Bakterienarten an verschiedene Sauerstoffspannungen angepaßt, sondern der großen Mehrzahl nach auf Luftleben angewiesen, so haben sie vor jenen doch voraus, daß sie großenteils auch auf sauren Substraten, wie Moorböden, tätig sein können. Dabei verarbeiten sie die mannigfachsten organischen Stoffe, Abbau- und Abfallprodukte höherer Wesen, welche sie, wenn nötig, durch Ausscheidung von Enzymen löslich machen. Eine Besonderheit, die viele unter ihnen vor den Spaltpilzen voraus haben, ist die Eigenschaft, auch verholzte Membranen zerstören zu können, der Hausschwamm und andere Basidiomyceten sind Beispiele dafür. Die Frage, inwieweit Pilze, die in Stämmen, Zweigen, Blättern der Pflanzen leben, Uebergänge zwischen saprophytischem und parasitischem Leben zeigen, ist im Artikel „Parasiten“ diskutiert. Leider wissen wir noch in fast keinem Fall sicher, ob es höhere Pilze gibt, die selbständig den freien Stickstoff binden können, eine Befähigung, die vielen, z. B. im Laub des Waldbodens hausenden Pilzen zugeschrieben wird. — Die Temperaturgrenzen, innerhalb deren Pilze wachsen, sind recht weit gesteckt; die einen leben in kühlen Böden oder Wässern, die anderen bei der Temperatur erhitzter Heuhaufen. Zu den letzteren, den thermophilen Pilzen, zählen nach Miehe Arten der Gattung Actinomyces, Mucor, Aspergillus, Thermomyces, Thermoascus, welche zum Teil auch im Leib der Warmblüter als Krankheitserreger auftreten können.

Die auffallendste Tatsache, welche die Lebensweise der Pilze vor derjenigen der Bakterien auszeichnet, ist die Erscheinung, daß sie mittels des Spitzenwachstums ihres Mycels auf weite Strecken hin zu wandern und ihr Substrat „abzusuchen“ vermögen. Vermittels dieses Spitzenwachstums durchwuchern sie Baumäste auf lange Strecken, von totem auf lebendes Gewebe dabei übergreifend, dem Spitzenwachstum ist es zu verdanken, daß sie gefallenes Laub zusammenflechten können, wie z. B. Cladosporium und viele andere Arten, daß sie „die Bodenkörner nicht selten zu einer festen, etwas elastischen Masse, die sich mit dem Messer schneiden läßt, verspinnen“ (Ramann). Die Bodenkunde Ramanns belehrt uns darüber, daß Mycelpilze in lockeren, nährstoffreichen Böden, in denen viele Bakterien hausen, an Zahl zurücktreten und nur in der Nähe von Pflanzenresten sich reichlicher finden, mit der Dichtlagerung der Böden aber zahlreicher werden. In Waldböden tragen sie wesentlich bei zur Beförderung der Krümelung des Bodens.

Was die Arten der „Bodenpilze“ angeht, so können wir, wenn wir absehen von jenen Formen, die uns schon im Freien durch ihre großen Fruchtkörper auffallen, und uns im wesentlichen auf solche beschränken, welche die biologische Bodenanalyse im Laboratorium nachweist, sagen, daß zumal Mucorarten, ferner Aspergillen, auch Hefen und andere Sproßpilze häufig sind, sodann Zygorhynchus Mölleri, eine Form, die auf der Grenze zwischen Oomyceten und Zygomyceten steht. Ferner werden Cladosporium humifaciens (auf gefallenem Laub), Trichoderma viride, Cephalosporium Koningi u. a. m. genannt (Literatur bei Ramann).

Wachsen Pilze vielfach auf Humusböden, so tragen sie auch bei zur Bildung des Humus aus pflanzlichen Resten. Mit Ramann können wir drei Phasen bei der Humusbildung unterscheiden: „1. Zersetzung der abgestorbenen organischen Reste durch chlorophyllfreie Organismen aller Art unter Erhaltung der organisierten Zellstruktur und mehr oder minder der ursprünglichen Form; 2. Zerkleinerung der Massen durch Tiere und Mischung mit den Mineralteilen des Bodens; 3. Zerstörung der organisierten Zellstruktur, Verbrauch der leichter angreifbaren Bestandteile der Abfallreste und Hervortreten der ausgesprochen kolloiden Eigenschaften der noch erhaltenen organischen Verbindungen.“ Es ist nun klar, daß Phase 1 und 3 wesentlich auf der Tätigkeit von Bodenmikroben, Bakterien und Pilzen beruht, und die meisten Forscher nennen die letzteren die „eigentlichen Humusbildner“. Auch die schwarze Färbung des Humus soll auf Farbstoffen beruhen, die von den Pilzen gebildet werden und auch in den Kulturgefäßen auftreten können (außerdem werden Bakterien, z. B. Azotobacter, als wichtige Farbstoffbildner genannt).

Wenn wir sehen, daß die Pilze verschieden artige Substrate bevorzugen, die einen auf Holz, die anderen mehr auf Laub, noch andere auf Dünger (Coprinus, Sordaria u. a. m.) gedeihen, so erhebt sich die Frage, ob der Humus je nach seiner Herkunft eine verschiedenartige Pilzflora trägt. Die Frage wird dahin beantwortet, daß viele Pilze auf allen Sorten von Humus vorkommen. Warming aber erinnert daran, daß z. B. Clavaria abietina vorzüglich im Humus von Fichtenwäldern vorkommt und auch Lactarius deliciosus an den Humus von Nadelwald gebunden ist.

2i) Moose. Inwieweit Moose saprophytisch leben, ist im großen und ganzen noch nicht bekannt. Daß sie organische Stoffe resorbieren können, lehren einige experimentelle Erfahrungen und Haberlandt führte durch mikroskopische Beobachtung der Rhizoiden von Laubmoosen, welche vielfach ins Innere der Zellen abgefallener Blätter usw. eindringen, den Wahrscheinlichkeitsbeweis dafür, daß sie organische Nährstoffe aufnehmen. Als saprophytische, genauer hemisaprophytische Moose werden ferner jene eigenartigen Splachneen bezeichnet, die auf Dünger ihren Standort aufschlagen; Ernährungsversuche mit diesen Formen fehlen noch.

Brotherus entnehmen wir die Angabe, daß 9 Arten von Tetraplodon auf Exkrementen von Fleischfressern und modernden Leichen kleiner Tiere in kalten Gegenden und im Hochgebirge leben. Haplodon lebt ebenfalls auf tierischen Exkrementen an feuchten Stellen und in tiefen Mooren der arktischen Zone. Splachnum kommt in 7 Arten auf moderndem Rindviehdünger, seltener an morschen Baumstämmen, zumeist im Norden, vor. — Ob die Verpilzung gewisser Lebermoose, die von einer Infektion ihrer Rhizoiden den Ursprung nimmt, eine ernährungsphysiologische Bedeutung hat, weiß man nicht.

2k) Farne. Von den Farnpflanzen besitzen farblose, darum saprophytisch sich ernährende Gametophyten (Prothallien) zunächst die Ophioglossaceen. Bei Ophioglossum sind es „zylindrische, einfache oder verzweigte, radiär gebaute Knöllchen, bei Botrychium sind sie oval oder herzförmig und dorsiventral" (Schenck). Gleichfalls saprophytische Prothallien haben die Lycopodiaceen.

„Bei L. clavatum und annotinum stellen sie unterirdische, weißliche Knöllchen dar, welche anfangs kreiselförmig gestaltet, später durch Auswachsen der Randpartien zu vielgestaltigen, becherförmigen, wulstig gelappten, bis 2 cm großen Gewebekörpern werden, die mit langen Wurzelhaaren besetzt sind . . . Bei L. complanatum sind diese Gewebekörper rübenförmige, bei L. Selago dagegen rundliche oder zylindrische und gekrümmte Knöllchen, welche bei letzterer Art auch an der Oberfläche sich entwickeln können und dann ergrünen. Bei L. inundatum und dem tropischen L. cernuum sind die Prothallien kleine, im Boden steckende, chlorophyllarme Gewebekörper" (Schenck).

Alle diese Prothallien besitzen Mykorrhizen und ehe der Sinn dieser Mykorrhizabildung aufgeklärt ist, kann man über die Art und Weise, wie sie sich die nötigen Nährstoffe beschaffen, nichts bestimmtes aussagen. Eine Konsumtion von Pilzen oder Pilzteilen findet nicht statt. — Nebenbei sei erwähnt, daß auch die Sporophyten der Farne Mykorrhizen führen, z. B. die Rhizome von Psilotum usw. Auch Hymenophyllaceen, z. B. auf Baumfarnen epiphytisch lebende Formen werden für Saprophyten gehalten. Beweise dafür fehlen.

2l) Blütenpflanzen. Als holosaprophytische Blütenpflanzen bezeichnen wir alle diejenigen Blütenpflanzen, die kein oder doch nur so wenig Chlorophyll besitzen, daß seine Leistung für den Haushalt der Pflanze nicht wesentlich in Betracht kommt, und welche nicht auf anderen hochorganisierten Pflanzen schmarotzen. Alle diese Holosaprophyten haben verpilzte Wurzeln und zwar entotrophe Mykorrhizen, und da über deren Bedeutung nicht viel sicheres bekannt ist, kann auch nicht gesagt werden, wie die Holosaprophyten sich ihre Nahrung beschaffen. Nur soviel sei angedeutet, daß die holosaprophytischen Orchideen, Burmanniaceen und Gentianaceen den Pilz in ihrer Wurzel teilweise verdauen, es sind also Parasiten auf den Pilzen. Ob sie außerdem mit oder ohne Vermittlung ihres Pilzes noch organische Nährstoffe aus dem Boden beziehen, ist fraglich aber wahrscheinlich. Als Hemisaprophyten bezeichnet man Blütenpflanzen, die sich von den Holosaprophyten im wesentlichen nur durch bessere Ausbildung des Chlorophyllapparates unterscheiden; sie sind entweder freudig grün oder auch bleich. — Erfreuen sich alle diese Saprophyten des Besitzes einer entotrophen Mykorrhiza, so führen viele andere chlorophyllhaltige Blütenpflanzen eine ektotrophe, über deren Bedeutung gleichfalls wenig bekannt ist, trotz vieler äußerst anregender Arbeiten. Wir müssen es also unentschieden lassen, ob die mit ektotropher Mykorrhiza ausgestatteten Blütenpflanzen ebenfalls Hemisaprophyten sind oder ob die Mykorrhiza ihnen nur zu genügender Versorgung mit Nährsalzen verhilft. Diese Bemerkungen sollen nur zur oberflächlichen Orientierung dienen, wegen aller Einzelheiten sei auf den Artikel „Symbiose" verwiesen, wo auch nachgelesen werden kann, daß manche hemisaprophytischen Blütenpflanzen in der Jugend holosaprophytisch sich ernähren.

Wir beschäftigen uns im folgenden hauptsächlich mit den holosaprophytischen Blütenpflanzen. Solche fehlen bei den

Gymnospermen, finden sich aber bei den Di- und Monokotylen.

Dikotylen: Unter den Pirolaceen sind alle Monotropoideen holosaprophytisch. Am bekanntesten ist unsere gelblich gefärbte Monotropa hypopitys, die in einer kahlen Form im Buchenwald (M. hypophegea), behaart im Kiefernwald vorkommt. Andere Arten leben in Amerika, Japan und Indien, weitere Gattungen in Amerika und Asien. Unter den Piroleen haben wir in Pirola aphylla (Kalifornien) eine chlorophyllarme, mit Schuppen statt Blättern versehene, fast holosaprophytische Pflanze. Auch andere Pirolaarten sind mehr oder minder bleich (z. B. P. chlorantha u. a.).

Gentianaceen. Cotylanthera in Asien beheimatet, Voyria und Voyriella in Amerika und Leiphaimos ebenda und in Afrika sind holosaprophytisch, mit zu Schuppen reduzierten Blättern und Rosafärbung der oberirdischen vegetativen Teile. Bartonia und Obolaria, beide in Amerika, sind Hemisaprophyten mit Schuppen statt Blättern, erstere bleichgrün, mit weißen, letztere dunkelgrün (purpurgrün) mit weißen oder purpurnen Blüten.

Monokotylen: Triuridaceen. Eine Familie, welche in Sciaphila und Triuris kleine, holosaprophytische, gelbrötliche Pflänzchen umfaßt, die in den Tropen (Ceylon, Südamerika) leben.

Burmanniaceen. Diese zu den Liliifloren gehörige Familie umfaßt sowohl grüne als farblose Arten, die letzteren mit reduzierten Blättern; Perianth häufig sehr eigenartig geformt. Burmannia, Thismia u. a. sind tropische und subtropische Gattungen. Thismia javanica („Haarorchis") mit fadenförmigen Perianthanhängseln, Th. clandestina mit „mitraähnlichem" Perianth u. a.

Orchideen. Hier finden sich, wie allbekannt, neben vielen grünen Vertretern, die aber sämtlich eine entotrophe Mykorrhiza führen, auch Saprophyten. Es seien nur die Gattungen Neottia, Epipogium, Corralliorhiza genannt.

Was die Zahl der bekannten holosaprophytischen Blütenpflanzen angeht, so führte Johow im Jahr 1889 43 Gattungen mit 160 Arten auf. Ueber das Verbreitungsgebiet äußert sich derselbe Autor dahin, daß die meisten in den Tropenwäldern Amerikas und Asiens vorkommen, ganz besonders in den Urwäldern des malaiischen Archipels und des tropischen Südamerika, wo sie „gleichsam als die pflanzengeographischen Vertreter unserer Schwämme erscheinen", nur eine geringere Zahl beherbergt Afrika und Australien; bei uns ist einheimisch außer holosaprophytischen Orchideen nur Monotropa. In den kalten Gegenden fehlen sie, aus dem südlichen Südamerika kennt Johow nur eine Burmanniacee. Ihre Standorte sind feuchte, schattige Wälder, auch feuchte Savannen, gelegentlich Sanddünen; sie sind an lockeren Humusboden gebunden, gedeihen aber auch in festen tonigen Böden, falls dieselben mit Lösungen humöser Stoffe durchtränkt sind. Auch auf faulenden Stämmen sind sie anzutreffen. Als eigenartigen Standort von Sciaphila nennt Johow Termitennester. Was die Qualität des Humus angeht, so ist Monotropa hypopitys (vgl. oben) an Humus von Kiefern- oder Buchenwäldern gebunden. In Brasilien kommen nach Johow bestimmte Arten stets auf toten Wurzeln von Palmen vor. Die oberirdischen Teile der Holosaprophyten bestehen meistens nur aus dem Blütensproß, der als bleiches, gelbliches, bräunliches oder auch auffallend gefärbtes Gebilde erscheint. So sind manche recht auffallende Pflanzen, andere aber sind so klein und zart, unter Umständen auch von ganz derselben Farbe wie das gefallene Laub, daß sie kaum sichtbar sind, so z. B. die javanische Thismia clandestina. Als abweichend gebaut beschreibt Johow bestimmte saprophytische Orchideen, welche mittels federkielartigen, an Adventivwurzeln reichen Stengeln bis 40 Meter hoch klettern.

Besonders auffallend ist die weitgehende Reduktion der Blätter am Blütensproß, die oft nur noch als sehr kleine Schuppen sichtbar sind. Auf Einzelheiten im äußeren Bau der Blüte braucht hier nicht eingegangen zu werden. Oft studiert ist der Bau der unterirdischen Teile, Wurzeln oder Rhizome, die oft auch dann, wenn die Blütensprosse zart sind, kräftig entwickelt sein können. Mit Johow kann man zweierlei Ausbildungsformen der unterirdischen Teile unterscheiden, die korallenähnliche, wie z. B. bei Coralliorhiza, und die vogelnestartige, wie bei Neottia nidus avis. Erstere kommen mehr in festem, letztere mehr in lockerem Boden vor. In vielen Fällen sind die Wurzeln stark reduziert und können auch ganz fehlen; dann übernimmt das Rhizom ihre Funktion, so bei Coralliorhiza oder Epipogium. Das Rhizom bestimmter Formen (Burmanniaceen, Gastrodia und anderer Orchideen) hat die Form großer Knollen.

Schildern wir noch einige Fälle etwas genauer: Bei Thismia javanica beschreibt Ernst die unterirdischen Teile als weiße oder bräunliche Stränge von 1 mm Durchmesser, welche sich durch den Besitz einer Haube als Wurzeln charakterisieren und durcheinander verfilzt im Boden nach allen Richtungen dahinkriechen. Einige wachsen horizontal und bilden in akropetaler Folge Sproßanlagen; an deren Basis entsteht ein kleines Büschel von Seitenwurzeln, die nach allen Seiten ausstrahlen und zwischen welchen sehr früh die Blütenachse sich zeigt. Während diese sich streckt, wachsen dann wieder einige der Wurzeln an ihrer Basis horizontal aus, um nach einiger Zeit ihrerseits Adventivsprosse zu bilden.

Eigenartig sind auch die unterirdischen Teile bei Monotropa, welche allein über-

wintern, während die oberirdischen Teile einjährig sind und endogen aus den unterirdischen Teilen hervorsprossen. Diese sind zweifellos Wurzeln, denn sie besitzen keine Schuppenblätter und eine Haube; man hat sie „freilebende Wurzeln" genannt. Velenovsky nennt solche Gebilde Prokaulome, und beschreibt sie bei der hemisaprophytischen Pirola uniflora (Monesis grandiflora) als dünne Fäden mit haardünnen Verzweigungen, die, Pilzhyphen analog, den Boden durchziehen. Andere Pirolaceen haben gleichfalls zunächst nach der Keimung ein solches Prokaulom; später aber bilden sich aus den jungen Stengeln echte Rhizome, die 1 m weit kriechen können.

Wir sehen somit, daß die unterirdischen Teile für die Verbreitung und vegetative Vermehrung und, bei außertropischen Arten, auch für die Ueberwinterung von Bedeutung sind. Bei Neottia lösen sich am Rhizom Axillarknospen von Schuppenblättern los, die zu selbständigen, unterirdisch überwinternden Tochterpflanzen werden. Sehr bekannt ist auch die Erscheinung, daß bei dieser Pflanze Vegetationspunkte von Wurzeln unter Umwandlung ihrer Eigenart zu Sproßanlagen werden und selbständigen Pflanzen den Ursprung geben können.

Auch die Anatomie der Holosaprophyten weist manche gemeinsame Züge auf. In den meisten Fällen entbehrt die Wurzel der Wurzelhaare, an ihrer Stelle finden sich in manchen Fällen fingerhutartige Ausstülpungen. Etwas weniger reduzierte Wurzelhaare besitzen Sciaphilaarten und Cotylanthera tenuis. Eigenartigerweise können Epidermiszellen der Rhizome gelegentlich zu wurzelhaarähnlichen Schläuchen auswachsen. Die Wurzelrinde kann mächtig entwickelt, die trachealen Elemente im Zentralzylinder aber reduziert sein. Im Speichergewebe der verschiedenen Organe findet sich z. B. bei Thismia javanica in großen Mengen Stärke. Bei Thismia clandestina färben sich die gespeicherten Kohlehydrate mit Jodlösungen braun. Bei Cotylanthera färben sie sich nach Figdor wie Amylodextrin. Gleiches gilt für viele andere Saprophyten, wie Gentianaceen usw. Am Sproß fehlen Spaltöffnungen fast immer. Angegeben werden sie an den Schuppenblättern des Rhizoms von Epipogium, an den Schuppen der Blütensprosse von Burmannia candida als funktionslos gewordene Gebilde, und am Stengel von Cotylanthera tenuis. Das mechanische System kann stark reduziert erscheinen.

Ueber die Färbung der oberirdischen Teile ist oben schon einiges gesagt. Sie wird durch gefärbten Zellsaft bedingt, so die rötlich-purpurnen Färbungen, während gelbbraune Töne durch entsprechend gefärbte Chromatophoren hervorgerufen werden. Letzteres bei Neottia.

Nach Molisch wird diese Pflanze beim Abtöten durch geeignete Mittel, etwa heiße Salzsäure, grün und der Farbstoff verhält sich ebenso wie der der Braunalgen und Diatomeen. Schimper fand, daß der braune Farbstoff innerhalb der Chromatophoren auskristallisieren kann. Mehr oder minder grüne Färbung durch Chlorophyll bei vielen auf der Grenze zwischen Hemi- und Holosaprophytismus stehenden Formen ist bereits erwähnt worden.

Von sonstigen Inhaltskörpern der Zellen seien Kristalle von Kalkoxalat erwähnt, die häufig in großer Menge auftreten.

Auf die Entwickelung und Ausbildung von Blüte und Frucht der Holosaprophyten gehen wir nicht ein. Hingewiesen sei nur in aller Kürze auf die darauf bezüglichen Arbeiten von Ernst und Bernard über javanische Burmanniaceen. Bei Burmannia coelestis wird die Embryosackmutterzelle direkt zum Embryosack und auch die weitere Entwickelung in demselben erfolgt ohne Reduktionsteilung. Von den drei mit diploiden Kernen ausgerüsteten Zellen am mikropylaren Embryosackpol entwickelt sich eine, zwei oder alle drei ohne Befruchtung zu Embryonen, so daß hier Parthenogenese mit Polyembryonie verbunden sein kann. Bei Burmannia Championi und candida, bei welchen beiden Arten Autogamie stattfindet, geht der Kern der Embryosackmutterzelle Reduktionsteilung ein und es bilden sich vier, drei oder nur zwei Tetradenzellen, deren eine zum Embryosack wird. Wir können also eine Reihe konstruieren, die von vollkommener Tetradenbildung bis zu ihrer vollständigen Unterdrückung führt. Thismia javanica zeigt Tetradenteilung ohne Reduktion der Chromosomenzahl. Wegen aller weiterer Besonderheiten, zumal auch betreffs dieser Dinge bei anderen Saprophyten, sei auf die Literatur verwiesen.

Eine besondere Eigentümlichkeit der Samen aller Holosaprophyten besteht darin, daß sie äußerst klein sind und öfters auch in großer Zahl ausgebildet werden. Sie stellen eine staubförmige Masse vor, die, zumal wir auch „Fluggewebe" an ihnen beobachten können, leicht durch den Wind verbreitet werden. Der durch die geringe Größe bedingte geringe Gehalt an Reservestoffen hat deshalb keine schädlichen Folgen, weil die Keimung ohnehin an Mykotrophie gebunden ist. Die Samen von Cotylanthera tenuis werden geradezu als unendlich klein bezeichnet, diejenigen von Thismia clandestina sind $^1/_3$ mm lang. Allbekannt ist die geringe Größe der Samen von Epipogium und allen anderen Orchideen. — Eine Samenschale kann fehlen, z. B. bei Voyria.

Das Endosperm ist wenig mächtig entwickelt, und der Keim aller Holosaprophyten stellt einen kleinen ungegliederten Gewebekörper vor, der z. B. bei Burmannia candida nur aus 3 bis 4 Zellen besteht.

Bei der Keimung bildet sich zuerst das sogenannte „Protokorm", ein kegelförmiges

Gebilde, das zunächst keine weitere Gliederung zeigt, in Symbiose mit dem Mykorrhizenpilz tritt und dann erst sich kormophytisch ausgestaltet.

Anhangsweise sei erwähnt, daß auch viele Epiphyten mit mehr oder minder guter Begründung für Saprophyten (und zwar Halbsaprophyten) gehalten werden und daß auch die Insektivoren sich saprophytisch von den Stoffen ernähren, die aus den Leichen der von ihnen gefangenen Tiere stammen. Von ihnen sowie von den Epiphyten handeln besondere Artikel dieses Handbuchs (vgl. die Artikel „Insectivoren" und „Epiphyta").

Literatur. **Engler-Prantl**, *Natürliche Pflanzenfamilien.* — **A. Ernst**, *Ber. d. deutsch. bot. Ges., Bd.* **27**, *S. 157, 1909.* — **A. Ernst und C. Bernard**, *Ann. du jardin botan. de Buitenzorg, 1910, Bd.* **8**, *2. sér., p. 20; 1911, Bd.* **9**, *2. sér., p. 55; 1912, Bd.* **10**, *2. sér., p. 161.* — **W. Figdor**, *Ebenda, Bd.* **14**, *S. 213, 1897.* — **F. Johow**, *Jahrb. f. wiss. Bot., Bd.* **20**, *S. 475, 1889.* — **H. Lohmann**, *Verh. d. deutsch. zool. Ges., S. 16. Halle 1912.* — **Th. Meinhold**. *Cohn's Beiträge* **10**, *S. 357, 1911.* — **H. Molisch**, *Bot. Zeitg., Bd.* **63** *I, S. 144, 1905.* — **W. Pfeffer**, *Pflanzenphysiologie, Bd.* **1**, *2. Aufl. Leipzig 1897.* — **E. Ramann**, *Bodenkunde, 3. Aufl. Berlin 1911.* — **O. Richter**, *Mon. u. Abh. z. intern. Revue d. ges. Hydrobiologie, Bd.* **2**. *Leipzig 1911.* — **A. F. W. Schimper**, *Pflanzengeographie. Jena 1898.* — **E. Strasburger** *und Mitarbeiter, Lehrbuch der Botanik, 11. Aufl. Jena 1911.* — **Ch. Ternetz**, *Jahrb. f. wiss Bot., Bd.* **51**, *S. 435, 1912.* — **J. Velenovsky**, *Vergleichende Morphologie der Pflanzen, I bis III., Prag 1905 bis 1910.* — **E. Warming**, *Lehrbuch der ökologischen Pflanzengeographie, 2. Aufl. Berlin 1896.* — **E. Warming und W. Johannsen**, *Lehrbuch der allgemeinen Botanik. Berlin 1909.* — **R. v. Wettstein**, *Handbuch der systematischen Botanik, Leipzig und Wien 1911, und die in diesen Werken zitierte Literatur.*

Anm. b. d. Korr.: Nicht mehr benutzt werden konnten: **A. Ernst und C. Bernard**, *l. c. Bd.* **11** *S. 219, 1912 (Burmaniaceen), und* **E. Pringsheim**, *Cohn's Beiträge Bd.* **11**, *S. 305 und Bd.* **12**, *S. 1 (Flagellaten und Algen).*

W. Benecke.

Sars

Michael.

Geboren am 30. August 1805 in Bergen, gestorben am 22. Oktober 1869 in Kristiania, studierte seit 1823 Theologie und wurde 1830 Pastor in Kinn. 1839 in Mangar an der norwegischen Küste in der Nähe von Bergen. Die Nähe der Küste, veranlaßte ihn zu naturwissenschaftlichen Studien, deren Resultate er in gediegenen Untersuchungen der Entwickelung und der Metamorphose niederer Tiere veröffentlichte. Die Tiergeographie förderte er in seiner „Fauna littoralis Norvegiae" (Bergen 1846, 2. T. 1856) wesentlich durch Aufstellung verschiedener Tiefenzonen. 1854 wurde er in Anerkennung seiner Verdienste als Professor der Zoologie nach Kristiania berufen. Er führte wissenschaftliche Reisen nach den Lofoten und Finnmarken aus und studierte 1852 und 1853 die Fauna des Mittelmeeres. Sars hat die Kenntnisse über den Generationswechsel wesentlich gefördert, ja ihn eigentlich erst für die Wissenschaft entdeckt. Er ist ferner der Entdecker der rezenten Crinoiden.

Seine Werke sind: „Mémoire pour servir à la connaissance des Crinoides vivants" (Kristiania 1868), „Bidrag til Södyrenes Naturhistorie" (Bergen 1829), „Bes Krivelser og Jagttagelser over nogle märkelige eller nye i Havet ved den Bergenske Kyst levende dyr" (Bergen 1835), „Om de i Norge forekommende fossile dyrelevninger fra Quartärperioden" (Kristiania 1865), „Bidrag til Kundskab om Christianiafjordens Fauna" (Bergen 1868).

Literatur. **Carus**, *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — **Burckhardt**, *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Sattel

In der Geologie bei Schichtenfaltung und Schichtenbiegung der nach der Oberseite der Schichten konvexe Teil der Biegung (vgl. den Artikel „Schichtenbau").

Sauerstoffgruppe.

a) Sauerstoff. b) Schwefel. c) Selen. d) Tellur. e) Chrom. f) Molybdän. g) Wolfram. h) Uran.

a) Sauerstoff.

Oxgenium: O. Atomgewicht: 16,00.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. Geschichte. 3. Darstellung. 4. Eigenschaften. 5. Flüssiger und fester Sauerstoff. 6. Wertigkeit. 7. Konstitution der Oxyde. 8. Hydroxylion. 9. Nachweis und Bestimmung des Sauerstoffs. 10. Kreislauf des Sauerstoffs in der Natur. 11. Spezifische Reaktionen des Sauerstoffs. 12. Atmosphärische Luft. 13. Ozon. 14. Spektroskopisches.

1. Atomgewicht. Nach einem Vorschlage von Ostwald ist bekanntlich Sauerstoff als Basis für die Atomgewichte angenommen. Man setzt das Atomgewicht des Sauerstoffs = 16; dann ist dasjenige des Wasserstoffs = 1,008. Die genaue Ermittlung der Atomgewichte der übrigen Grundstoffe bezogen auf Wasserstoff bietet Schwierigkeiten, da wenige zur Analyse geeignete Wasserstoffverbindungen der Elemente bekannt sind; in der Regel sind die Atomgewichte aus Analysen der Sauerstoffverbindungen abgeleitet.

Für die endgültige Festlegung der Atomgewichte des Wasserstoffs und Sauerstoffs ist die Ermittlung des Verhältnisses fundamental, in welchem die beiden Elemente sich zu Wasser vereinigen. Dieses ist von ver-

schiedenen Forschern, am genauesten wohl von Morley (1891 bis 1896) ermittelt; immerhin übersteigt die Genauigkeit nicht 1°/₀₀. Nach jeder Neuberechnung dieses Verhältnisses müßte man auch die Atomgewichte der übrigen Elemente wieder korrigieren, wollte man die Basis H = 1 einführen. Aus diesem Grunde ist die Sauerstoffbasis jetzt so gut wie allgemein angenommen; die obige Zahl für Wasserstoff ist aus den Messungen Morleys abgeleitet.

2. Vorkommen. Geschichte. Der Sauerstoff gehört schon aus dem Grunde zu den wichtigsten Elementen, als er von allen Grundstoffen in größter Menge vorkommt. Etwa $^1/_3$ der festen Erdrinde, über $^3/_4$ der Masse des Wassers und $^1/_4$ der Masse der Luft bestehen aus Sauerstoff, ferner ist er das zur Erhaltung des Lebens notwendige Element.

Nach neueren spektroskopischen Untersuchungen ist Sauerstoff auch auf der Sonne nachgewiesen.

Die Entdeckung des Sauerstoffs ist wohl zweifellos das Verdienst Scheeles, der schon in den Jahren 1771 bis 1772 das Element isolierte und seine Eigenschaften beschrieb. Seine „Abhandlung von der Luft und dem Feuer" ist aber erst 1777 im Druck erschienen; so kam es, daß inzwischen Priestley und Bayen zu der gleichen Entdeckung gelangten. Ferner ist Lavoisiers Name mit der Entdeckung des Sauerstoffs unzertrennlich verknüpft, weil er auf Grund derselben die moderne Verbrennungstheorie entwickelte. Schließlich ist hier noch der englische Arzt Mayow zu nennen, der schon 100 Jahre vor Scheele die Existenz des Sauerstoffs in der Atmosphäre vorhergesagt und seine Bedeutung für die Verbrennungsvorgänge geahnt hatte.

3. Darstellung. 1. Durch Elektrolyse des Wassers. In geeigneten Apparaten, wo Kathoden- und Anodenraum genügend getrennt sind, werden wässerige Lösungen von Schwefelsäure oder Natronlauge unter Verwendung von Platin- oder Nickelelektroden und unter Vermeidung größerer Stromdichten elektrolysiert; 1 Amp. entwickelt in der Minute 10,44 ccm Knallgas, entsprechend 3,48 ccm Sauerstoff (0°, 76 cm).

2. Aus Metalloxyden. Die Oxyde der Edelmetalle zerfallen beim Erhitzen in Metall und Sauerstoff, z. B. $2HgO = 2Hg + O_2$. Die höheren Oxyde des Mangans, MnO_2, Mn_2O_3 gehen bei heftiger Rotglut unter Sauerstoffentwickelung in Mn_3O_4 über (wenig geeignet zur Darstellung, da hohe Temperatur erforderlich).

MnO_2 gibt mit konz. H_2SO_4 erhitzt unter O_2-Entwickelung Manganosalz: $MnO_2 + H_2SO_4 = MnSO_4 + O + H_2O$. Baryumsuperoxyd gibt bei heller Rotglut (ca. 800°) Sauerstoff ab, unter Bildung von BaO. Da letzteres bei dunkler Rotglut (500 bis 600°) und Gegenwart von wenig Wasserdampf Sauerstoff aus der Luft unter Rückbildung des Superoxyds aufnimmt, läßt sich auf dieser Reaktionsfolge eine kontinuierliche Gewinnung des Sauerstoffs aus der Luft begründen.

Nach Kaßner erhält man eine gut regulierbare Sauerstoffentwickelung, wenn ein Brei von Baryumsuperoxyd bei gewöhnlicher Temperatur mit einer Lösung von Kaliumferricyanid behandelt wird:

$$2K_3Fe(CN)_6 + BaO_2 = Ba[K_3Fe(CN)_6]_2 + O_2.$$

Wasserstoffsuperoxyd H_2O_2 entwickelt in Gegenwart gewisser Stoffe, MnO_2, $KMnO_4$, $Ca(OCl)_2$ Sauerstoff; so ist als Füllung für den Kippschen Apparat eine Mischung von gekörntem Braunstein und eine angesäuerte (H_2SO_4)-Lösung von Hydroperoxyd empfohlen.

3. Aus Salzen von Sauerstoffsäuren. Die gewöhnlich benutzte Methode besteht in der Zersetzung von Kaliumchlorat bei höherer Temperatur. Der Vorgang verläuft in mehreren Stadien, wahrscheinlich nach:

$$2KClO_3 = KClO_4 + KCl + O_2$$
$$KClO_4 = KCl + 2\ O_2.$$

Die Zersetzung vollzieht sich bei wesentlich niederer Temperatur bei Gegenwart gewisser Kontaktsubstanzen, Fe_2O_3, CuO, PbO_2; in der Regel wird eine Mischung von Braunstein MnO_2 mit $KClO_3$ verwendet, bei der die Zersetzung schon bei etwa 200° erfolgt; das Gas ist CO_2- und Cl-haltig und muß mit Kalilauge gewaschen werden.

Reinen Sauerstoff erhält man bequem durch Erhitzen von Kaliumpermanganat:

$$2KMnO_4 = K_2MnO_4 + MnO_2 + O_2.$$

Zur technischen Darstellung aus Luft, dem billigsten Rohmaterial, wurde früher das schon erwähnte Verfahren mit Baryumsuperoxyd benutzt. Zeitweilig kam auch das Kaßnersche Calciumplumbat verfahren in Anwendung; danach wird Calciumplumbat bei höherer Temperatur durch feuchtes Kohlendioxyd zerlegt:

$$Ca_2PbO_4 + 2CO_2 = 2CaCO_3 + PbO + O,$$

das Gemisch von Calciumkarbonat und Bleioxyd zur Gewinnung des Kohlendioxyds mit Wasserdampf behandelt und über den Rückstand zur Regenerierung des Plumbats Luft und Wasserdampf geleitet:

$$2CaO + PbO + O_2 = Ca_2PbO_4.$$

Gegenwärtig wird die Hauptmenge des technischen komprimierten Sauerstoffs wohl durch fraktionierte Destillation der Lindeluft gewonnen. Die im Lindeschen Luft-

verflüssigungsapparat erhaltene Flüssigkeit ist im wesentlichen ein Gemenge von Sauerstoff und Stickstoff mit ca. 60 bis 70% O_2. Durch weitere fraktionierte Destillation läßt sich der Sauerstoff bis etwa 96% anreichern.

4. Eigenschaften des gasförmigen Sauerstoffs. Sauerstoff ist ein farbloses, geschmack- und geruchloses Gas, das nicht brennbar ist. Das Gewicht eines Liters Gas ist bei 0° und 76 cm Druck nach Morley: 1,42900 g (1896).

Der Ausdehnungskoeffizient beträgt 0,003674, die Abweichungen vom Boyleschen Gesetze betragen bei mittleren Drucken weniger als 1 : 5000.

Die Löslichkeit des Sauerstoffs in Wasser ist wesentlich größer als die des Wasserstoffs und nimmt wie die der anderen Gase mit steigender Temperatur ab. Nach Winkler ist der Absorptionskoeffizient (Volumen O_2 bei 0° und 76 cm Druck, die in 1 Volumen H_2O unter 1 Atmosphäre gelöst sind) bei verschiedenen Temperaturen:

0° 0,0489 20° 0,03102
10° 0,0380 30° 0,0261

In wässerigen Lösungen von Säuren, Basen und Salzen ist die Löslichkeit kleiner (was auch bei anderen indifferenten Gasen konstatiert ist). Wesentlich größer ist die Löslichkeit des Sauerstoffs in Alkohol, bei 0° ist der Absorptionskoeffizient 0,2337.

Okklusionserscheinungen. Am eingehendsten ist die Löslichkeit des Sauerstoffs in Silber untersucht. Unterhalb des Schmelzpunktes (960°) löst das feste Silber nur geringe Mengen des Gases, beim Schmelzpunkt steigt die Löslichkeit beträchtlich, um dann mit wachsender Temperatur wieder abzunehmen:

Temperatur	Druck mm Hg	Vol. O_2 von 1 Vol. Ag gelöst
923	755	0,59
1024	760	19,53
1075	760	18,42
1125	755	17,56

Das erstarrende Silber gibt bekanntlich den gelösten Sauerstoff unter der Erscheinung des „Spratzens“ wieder ab.

Von flüssigem Kupfer wird Sauerstoff in Form von Oxydul Cu_2O gelöst und beim Erstarren nicht wieder abgegeben. Wiederholt ist die Absorption des Sauerstoffs durch Platin untersucht; nach neueren Versuchen enthält das fein verteilte, mit Luft oder Sauerstoff in Berührung gekommene Metall (Platinschwarz, Platinmohr) stets größere Mengen Sauerstoff, der erst bei höherer Temperatur vollständig wieder abgegeben wird und der auch jedenfalls chemisch (etwa als Platinoxydul PtO) gebunden ist.

Die spezifische Wärme unter konstantem Druck (0° bis 260°) beträgt 0,2182, das Verhältnis der spezifischen Wärmen cp/cv ist 1,4025 (bis ca. 1600°). Bei höherer Temperatur steigen die spezifischen Wärmen des Sauerstoffs wie der anderen permanenten Gase beträchtlich an. Die mittlere Molekularwärme (spezifische Wärme × Molekulargewicht) bei konstantem Volumen ist etwa nach folgender Formel berechenbar:

$$4{,}76 + 0{,}00122\ t.$$

5. Flüssiger und fester Sauerstoff. Flüssiger Sauerstoff ist 1877 fast gleichzeitig von Cailletet und Pictet erhalten worden. Er stellt eine farblose oder nach Dewar schwach bläuliche Flüssigkeit dar, die leicht beweglich ist und einen deutlichen Meniskus bildet. Die kritische Temperatur liegt bei —113°, der kritische Druck beträgt 50,0 Atmosphären. Die Dichte des flüssigen Sauerstoffs ist:

$$d = 1{,}248874 - 0{,}00481\ (T - 68)$$

T = absolute Temperatur an der Wasserstoffskala gemessen. Die Dampfspannungen P betragen (Travers):

Temperatur C (Wasserstoffskala)	Druck P in mm
— 182,43	800
— 182,93	760
— 185,12	600
— 188,64	400
— 193,96	200

Bei höheren Temperaturen fand Olszewski folgende Abhängigkeit:

Temperatur (absolut)	Druck P in mm
154,2 (krit. Temp.)	44 080
144,0	26 144
126,0	10 412
113,1	4 735
90,6	760

Flüssiger Sauerstoff ist Nichtleiter der Elektrizität und ist stark magnetisch; sein magnetisches Moment ist 1 bezogen auf Eisen = 1000.

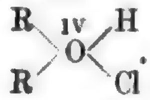
Fester Sauerstoff ist von Dewar als eine harte hellblaue Masse erhalten, deren Dichte bei —253° 1,4256 ist und deren Schmelzpunkt unter einem Druck von 0,9 mm bei —227° gefunden wurde.

6. Wertigkeit. Die Ansicht, daß der Sauerstoff ein konstant zweiwertiges Element

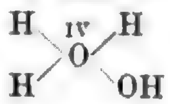
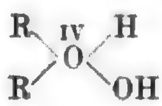
sei, erfuhr eine Modifizierung durch das Studium gewisser meist organischer Sauerstoffverbindungen, von denen die am längsten bekannte der Friedelsche Chlorwasserstoffmethyläther ist:

$$CH_3 . O . CH_3 . HCl.$$

Collie und Tickle nehmen zur Erklärung der Existenz salzartiger Verbindungen des Dimethylpyrons $C_7H_8O_2 . HX$ an, daß der Sauerstoff in diesem (wie im Chlorwasserstoffmethyläther) vierwertig auftritt:



Schließlich zeigten von Baeyer und Villiger, daß die verschiedenartigsten Sauerstoffverbindungen (Alkohole, Ester, Aether, Ketone usw.) die Fähigkeit besitzen, mit Säuren Salze zu bilden, die sich von typischen Basen, den Oxoniumhydroxyden, ableiten, in denen vierwertiger Sauerstoff angenommen wurde:

 resp. 

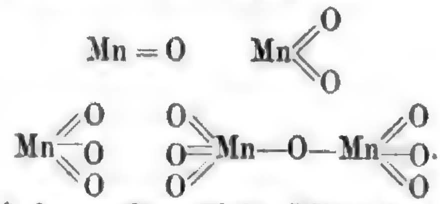
und die damit als Analoga der Ammoniumbasen erscheinen. Nachdem aber Werner in den Ammoniumsalzen Verbindungen erkannt hatte, bei denen das Stickstoffatom mit dem Säurewasserstoff durch sekundäre Affinitätskräfte, Nebenvalenzen, in Verbindung steht, lag es nahe, auch die Oxoniumverbindungen in die Klasse der Nebenvalenzverbindungen einzureihen, so daß man folgende Parallele hat:

$$(H_3N \ldots H)OH; \ (RH_2N \ldots H)X$$
Ammoniumverbindungen

$$(H_2O \ldots H)OH; \ (R_2O \ldots H)X$$
Oxoniumverbindungen.

Zur Charakteristik der Oxoniumbasen sei noch bemerkt, daß ihre Basizität meist äußerst gering ist, so daß die Salze: $OR_2 . HX$ in wässeriger Lösung fast völlig hydrolytisch gespalten sind. Die Oxoniumverbindungen spielen in der neueren Theorie der Lösungen zur Erklärung gewisser Solvatationserscheinungen eine nicht unwichtige Rolle. In den Verbindungen $OR_1R_2 . HX$ ist das Sauerstoffatom asymmetrisch und es sollten sich derartige Verbindungen analog den Sulfoniumsalzen in optisch aktiven Formen gewinnen lassen. Eine Realisierung dieser Isomeriefälle ist jedoch noch nicht erreicht worden.

7. Konstitution der Oxyde. In den Sauerstoffverbindungen der Elemente setzt man durchweg bivalenten Sauerstoff voraus und macht die weitere Annahme, daß in der Regel beide Valenzen jedes Sauerstoffatoms von den betreffenden Metall- oder Metalloidatomen abgesättigt werden, so resultieren Konstitutionsformeln wie:



Bei den mehrwertigen Elementen spielt deren maximale Valenz zum Sauerstoff eine besondere Rolle, da diese in der Stellung des Elements im periodischen System charakteristisch zum Ausdruck kommt; wahrscheinlich ist diese maximale Sauerstoffvalenz eine für die betreffende Gruppe charakteristische Konstante, wie folgender kleine Ausschnitt aus dem periodischen System der Elemente zeigen möge:

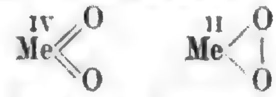
I	II	III	IV
Li_2O	BeO	B_2O_3	CO_2
Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2
Rb_2O	SrO	Y_2O_3	ZrO_2
Cs_2O	BaO	La_2O_3	CeO_2

V	VI	VII	VIII
N_2O_5	—	—	—
P_2O_5	SO_3	Cl_2O_7	—
Nb_2O_5	MO_3	—	RuO_4
Ta_2O_5	WO_3	—	OsO_4

Von den oben charakterisierten Oxyden muß man die sogenannten Peroxyte oder Peroxydate unterscheiden, in denen eine O_2-Gruppe in folgender Bildung vorhanden ist:



und die danach als Abkömmlinge des Hydroperoxyds zu betrachten sind. Bei Elementen mit mehreren Oxydationsstufen (z. B. zwei- und vierwertigen Metallen) ist somit eine Oxydisomerie vorherzusehen:



Superoxyd Peroxydat.

doch scheint diese Isomerie mit Sicherheit noch nicht realisiert zu sein, da in der Regel die Peroxydate der Schwermetalle nicht rein erhalten wurden. Außer den Peroxydaten der Alkali- und Erdalkalimetalle sind solche des Zinks, Quecksilbers, Nickels u. a. dargestellt. Von den Superoxyden unterscheiden sich die Peroxydate dadurch, daß erstere

mit Salzsäure Chlor, letztere in der Regel Hydroperoxyd geben (vgl. auch den Artikel „Oxyde").

8. Hydroxylion. Es ist sehr wahrscheinlich, daß Sauerstoff zweiwertige Ionen O'' bildet, die die zweite Dissoziationsstufe des Wassers:

$$H_2O \rightleftarrows H^{\cdot} + OH'$$
$$OH' \rightleftarrows O'' + H^{\cdot}$$

darstellen, doch ist ihre Konzentration jedenfalls stets äußerst klein. Wichtiger ist die Verbindung des Sauerstoffs und Wasserstoffs im ionisierten Zustande, das Hydroxylion OH', das in sehr geringer Konzentration im Wasser (1×10^{-7}) und in mehr oder weniger größerer Konzentration in den typischen Basen enthalten ist. Die wichtigsten Eigenschaften der Hydroxylionen sind folgende:

1. Physiologische Eigenschaften: laugenhafter Geschmack.

2. Farbreaktionen auf Indikatoren (Phenolphtalein, Lackmus u. a.): diese werden nach neueren Untersuchungen nicht durch bloße Salzbildung, sondern durch intramolekulare Umlagerungen bewirkt, die den Hydroxylionen eigentümlich sind.

3. Katalytische Reaktionen: die OH'-Ionen vermögen die Verseifung der Ester katalytisch zu beschleunigen; im Sinne der Ionenlehre ist diese Reaktion bei Aethylacetat:

$$CH_3COOC_2H_5 + OH' = CH_3COO' + C_2H_5OH$$

zu formulieren. Die katalytische Wirkung ist annähernd der Konzentration an Hydroxylionen proportional und die Untersuchung der Verseifungsgeschwindigkeit stellt eine wichtige Methode zur Bestimmung der OH'-Ionenkonzentration dar. Auch die Geschwindigkeit anderer Vorgänge wie der Multirotationsänderungen der Zuckerarten wird durch Hydroxylionen beeinflußt.

Mit dem Wasserstoffion ist das Hydroxylion durch eine verhältnismäßig geringe Bildungstendenz ausgezeichnet und zeigt wie jenes einen abnorm hohen Wert der elektrolytischen Wanderungsgeschwindigkeit. Die Werte für diese sind bei 18°: 174, bei 25°: 196. Das Potential der Sauerstoffelektrode: Pt (platiniert) umgeben von O_2 beträgt in 1-n H·-Ionenlösung: 1,23 Volt, in 1-n OH'-Ionenlösung: 0,43 Volt (bezogen auf die H_2-Elektrode); man vgl. die Artikel „Elektrochemie" und „Potential".

9. Nachweis und Bestimmung des Sauerstoffs. Qualitativ wird reines oder mit nur geringen Mengen anderer Gase vermischtes Sauerstoffgas durch die Eigenschaft erkannt, einen glimmenden Span zur Entzündung zu bringen, doch ist zu beachten, daß auch Stickoxydul die gleiche Eigenschaft besitzt. Quantitativ wird Sauerstoff in Gasgemischen oder in Lösungen nach den Methoden der Gasanalyse bestimmt, auf die hiermit verwiesen sei; wichtige Hinweise findet man auch in Travers, Experimentelle Untersuchung von Gasen. Absorptionsmittel für Sauerstoff, die in der Gasanalyse verwendet werden, sind:

1. Phosphor, der in dünnen Stangen bei Gegenwart von Wasser angewendet wird.

2. Kaliumpyrogallat; dasselbe gibt bei der Absorption des Sauerstoffs kleine Mengen von Kohlenoxyd ab, weshalb dieses Mittel für spektroskopische Zwecke ausgeschlossen ist;

3. metallisches Kupfer bei höherer Temperatur;

4. metallisches Kupfer bei Gegenwart einer wässerigen Lösung von Ammoniak und Ammoniumkarbonat oder einer Lösung von Kupferchlorür in Salzsäure (auch Ferro- und Chromosalze können als Absorptionsmittel angewendet werden).

10. Kreislauf des Sauerstoffs in der Natur. Die Vorgänge in der Natur, an denen Sauerstoff beteiligt ist, können wir in sauerstoffverbrauchende und sauerstoffproduzierende scheiden. Zu den ersteren sind vor allen die Atmungs- und Verwesungsprozesse zu zählen, die langsame Verbrennungen (vgl. den Artikel „Oxydation") im lebenden und toten Organismus darstellen und die als letzte Zersetzungsprodukte Wasser und Kohlendioxyd liefern. Letzteres wird nun durch einen sauerstoffproduzierenden Vorgang, den Assimilationsvorgang, der Atmosphäre wieder teilweise entzogen und dem pflanzlichen Organismus einverleibt. Die Assimilation des Kohlendioxyds in den grünen Pflanzen ist die in der Natur sich in allergrößtem Maßstabe abspielende photochemische Reaktion, durch die strahlende Energie der Sonne in chemische Energie umgewandelt wird. Diese Reduktion des Kohlendioxyds im Licht, wobei Sauerstoff abgespalten wird, vollzieht sich unter Mitwirkung des in den grünen Pflanzen vorhandenen Chlorophylls, das sich aktiv an der Reduktion beteiligt und nicht etwa die Rolle eines Katalysators spielt. Der Reduktionsmechanismus ist im einzelnen noch nicht aufgeklärt; nach einer Theorie von v. Baeyer ist das erste Reduktionsprodukt das Kohlendioxyds Formaldehyd CH_2O, aus dem im pflanzlichen Organismus die komplizierteren Stoffe, vor allem Stärke aufgebaut werden. Näheres siehe im Artikel „Photosynthese".

11. Spezifische Reaktionen des Sauerstoffs. Sauerstoff vermag gewisse Lichtreaktionen in auffälliger Weise zu hemmen. So wird die Geschwindigkeit der Vereinigung des Chlorknallgases im Licht durch Spuren

von Sauerstoff erheblich verringert, was neuerdings eingehend von Chapman und Mac Mahon untersucht worden ist. Die häufig beobachtete geringe Reproduzierbarkeit der Messungen am Chlorknallgas-Aktinometer beruht schließlich auf der Wirkung der Sauerstoffspuren. Schon vor Chapman und Mac Mahon fanden Luther und Goldberg in Uebereinstimmung mit anderen Forschern, daß viele Photochlorierungen durch Sauerstoff gehemmt werden, hierzu gehören die Reaktion zwischen Chlor und Kohlenoxyd, ferner Chlorierungen organischer Verbindungen, wie Essigsäure, Benzol und Homologe, so daß die Reaktionshemmung durch Sauerstoff eine konstante Begleiterscheinung der Photochlorierung darstellen dürfte. Bei diesen negativen Katalysen wird der Sauerstoff wahrscheinlich in irgend einer Weise verbraucht oder gebunden; auch die sogenannte „Induktionsperiode" bei Photochlorierungen hängt mit dem Verbrauch von Sauerstoff zusammen; in dem Maße, wie die Sauerstoffkonzentration sinkt, steigt die Reaktionsgeschwindigkeit zwischen Chlor und dem zu chlorierenden Stoffe. Auch die Reaktionen mit Brom, die durch Licht beschleunigt werden, sind in analoger Weise sauerstoffempfindlich.

Die Oxydationserscheinungen, d. h. die chemischen Prozesse, bei denen Stoffe unter dem Einfluß des Sauerstoffs oder sauerstoffhaltiger Verbindungen in neue Stoffe, Oxydationsprodukte, verwandelt werden und die in ihrem Verlauf eine große Mannigfaltigkeit aufweisen, werden in einem besonderen Artikel behandelt (vgl. den Artikel „Oxydation").

12. Die atmosphärische Luft. Die atmosphärische Luft (vgl. auch den Artikel „Atmosphäre") ist im wesentlichen ein Gemenge von 79 Volumteilen Stickstoff und 21 Volumteilen Sauerstoff, das außerdem noch kleinere Mengen von Argon sowie den anderen inaktiven Gasen Neon, Krypton, Xenon, ferner Kohlendioxyd und Wasserdampf enthält; außerdem fehlen fast nie gewisse flüchtige Stickstoffverbindungen wie Ammoniak und salpetrige Säure.

Durch besondere örtliche Verhältnisse ist weiter das Vorkommen anderer Stoffe bedingt: die Seeluft enthält meistens geringe Mengen fester Salze, wie Kochsalz, in äußerst feiner Verteilung; die über den Vulkanen lagernde Atmosphäre Schwefeldioxyd. Die Nähe industrieller Betriebe bedingt das Vorkommen von Ruß, verschiedener Gase, wie Chlorwasserstoff, Schwefeldioxyd u. a., sowie von Mikroorganismen in der Atmosphäre.

Da die Zusammensetzung der Luft in früheren geologischen Perioden sicher eine andere war wie jetzt und in langen Zeitläuften weiteren Veränderungen unterworfen sein wird, so sind Luftanalysen von großer allgemeiner Bedeutung. Die erste Präzisionsmessung des Sauerstoffs in der Luft hat Cavendish 1781 ausgeführt; wenn man berücksichtigt, daß sein Wert (20,85%) nur um ca. 0,08% von dem jetzt angenommenen Mittelwert differiert, so verdient diese Exaktheit hohe Bewunderung. Später führten u. a. Gay-Lussac, Davy, Saussure nach verschiedenen Methoden Luftanalysen aus; aus neuerer Zeit sind besonders Bunsen, Regnault, Leduc, Kreußler, Hempel zu nennen. Regnault hat Luft von den verschiedensten Regionen der Erde untersucht mit dem Ergebnis, daß der Sauerstoffgehalt merklichen aber geringfügigen Schwankungen (einige hundertstel Prozente) unterworfen ist; der Mittelwert ist etwa 20,95%; in einigen abnormen Fällen (Meerbusen von Bengalen, Ganges) ging der Wert bis auf 20,4% herunter. Hempel bestätigte im wesentlichen die Resultate Regnaults; er nimmt als Mittelwert 20,93% an.

Ueber den Kohlendioxydgehalt der Luft existiert eine sehr umfangreiche Literatur, bezüglich der auf eine Arbeit von Blochmann verwiesen sei. Danach enthalten 10000 Volumen Luft durchschnittlich 3 Volumen CO_2; die Schwankungen sind unter normalen Verhältnissen gering und bewegen sich zwischen 2,5 und 3,5 Volumen. Bei Nebel und bedecktem Himmel, sowie bei Schnee und Regen ist der Gehalt an Kohlendioxyd etwas höher, auch scheint er von der Tageszeit abhängig zu sein, derart, daß die Luft über dem Festlande bei Tage etwas weniger Kohlendioxyd enthält als bei der Nacht; im übrigen ist der Gehalt über dem Lande und der See nicht wesentlich verschieden, dagegen erhöhen ihn außergewöhnliche barometrische Depressionen. Die annähernde Konstanz des Kohlendioxydgehalts in der Atmosphäre beweist, daß dessen Produktion durch vulkanische Tätigkeit sowie die vielfachen Verbrennungsvorgänge kohlenstoffhaltiger Stoffe durch den Kohlendioxydverbrauch infolge vegetativer Prozesse u. a. etwa kompensiert wird. Daneben wirkt auch das Meer als mächtiger Regulator, das bei Ueberdruck größere Mengen des Gases aufzunehmen, auf der anderen Seite wieder abzugeben vermag, falls der Kohlensäuredruck in der Atmosphäre unter einen bestimmten Wert gesunken ist; hierbei spielt auch die Bildung und der Zerfall der Bikarbonate im Wasser eine wichtige Rolle.

Der Gehalt der Luft an Wasserdampf ist größeren Schwankungen ausgesetzt und entspricht in der Regel nicht dem Zustande der Sättigung bei den betreffenden Druck- und Temperaturverhältnissen. Nach Messungen von Regnault beträgt das Gewicht des Wasserdampfes (in mg) in 1 Liter Luft unter Atmosphärendruck bei verschiedenen Temperaturen:

t		t	
— 20°	1,058	+ 15°	12,738
— 15°	1,567	+ 20°	17,147
— 10°	2,299	+ 25°	22,830
— 5°	2,355	+ 30°	30,079
0°	4,868	+ 35°	39,232
+ 5°	6,789	+ 40°	50,677
+ 10°	9,356		

Von A. Gautier sind die brennbaren Gase der Atmosphäre untersucht worden. Pariser Straßenluft enthielt in 100 Litern Mengen, die 12 mg Kohlenstoff und 4 mg Wasserstoff entsprachen; die Menge an Kohlenoxyd soll zwischen 1 und 2 mg pro 100 Liter schwanken. Der Wasserstoffgehalt soll nach Gautier 0,01 Volumprozent betragen, doch dürfte diese Angabe nach Rayleigh zu hoch gegriffen sein. See- und Höhenluft enthalten weit geringere Mengen an brennbaren Gasen.

Ferner ist in der Atmosphäre noch Ammoniak hauptsächlich in Form von Ammonium-Bikarbonat, -Nitrit und -Nitrat enthalten. Die Bildung der Ammoniakverbindungen ist teils auf elektrische Wirkungen in der Atmosphäre zurückzuführen, teils sind die Stoffe durch Zersetzung gewisser organischer Verbindungen aus dem Erdboden in die Luft gelangt. Die Mengen an Ammoniak schwanken beträchtlich je nach den örtlichen Verhältnissen, der Jahres- und Tageszeit etwa zwischen 0,1 und 40 Gewichtsteilen in 10^6 Gewichtsteilen Luft.

Schließlich ist noch das Vorkommen fester Stoffe in der Atmosphäre zu erwähnen, die teils anorganischer (Kieselsäure, Calciumkarbonat, Thonerde, Chloride, Sulfate, Eisensalze usw.), teils organischer Natur sind (Mikroorganismen). Die anorganischen festen Stoffe dürften häufig kosmischen Ursprungs sein, dafür spricht das Vorkommen gewisser Stoffe (gediegenes Eisen, Nickel u. a.) auf den Eisfeldern der nördlichsten Punkte der Erde. Neuerdings hat N. W. Hartley mit Hilfe spektroskopischer Methoden den Straßenstaub Londons auf Metalle untersucht und darin u. a. Blei, Nickel und Kupfer gefunden.

Das meiste Interesse für den Chemiker beanspruchen die in der Atmosphäre enthaltenen inaktiven Gase, deren Erforschung im Jahre 1894 mit der wichtigen Entdeckung des Argons durch Lord Raleigh und Ramsay beginnt. Die genaue Bestimmung des Gehalts der Luft an den inaktiven Gasen (Edelgasen) ist ziemlich schwierig. Travers leitet aus Destillationsversuchen mit flüssiger Luft und Argon folgende Tabelle ab:

Helium . .	1 bis 2	T. in	1 000 000	T. Luft	
Neon . . .	1 bis 2	„ „	100 000	„ „	
Argon . .	0,937	„ „	100	„ „	
Krypton .	1	„ „	1 000 000	„ „	
Xenon . .	1	„ „	20 000 000	„ „	

Der Ozongehalt in der Atmosphäre ist früher häufig überschätzt worden, da Verwechslungen mit salpetriger Säure und anderen Oxydationsmitteln vorgekommen sind; er schwankt je nach den äußeren Bedingungen zwischen 0,002 und 0,01 mg pro 100 Liter Luft. Der Ozongehalt scheint für die natürliche Luftreinigung von Bedeutung zu sein, da das Ozon die in der Luft schwebenden Keime zu zerstören vermag. Hartley hat nachgewiesen, daß Ozon ein regelmäßiger Bestandteil der oberen Schichten der Atmosphäre ist und hier in größerer Menge vorkommt als in den unteren; wahrscheinlich wird es in den oberen Schichten durch die ultraviolette Strahlung der Sonne gebildet und in den unteren teilweise wieder zerstört.

Flüssige Luft. Die ersten erfolgreichen Versuche zur Darstellung flüssiger Luft verdankt man Cailletet, der sie durch adiabatische Expansion des auf 200 Atmosphären komprimierten Gases in Form eines Nebels erhielt; später ist sie von Dewar, Olszewski, Wroblewski und anderen erhalten worden. Das Verdienst, Luft in großen Mengen verflüssigt und die flüssige Luft der Technik nutzbar gemacht zu haben, gebührt Linde und Hampson.

Der Siedepunkt der flüssigen Luft liegt bei —192°. Die Zusammensetzung der flüssigen Luft erleidet beim Stehen unter Atmosphärendruck eine stetige Veränderung; deshalb ist auch ihre Dichte veränderlich:

Dichte	Sauerstoffgehalt
1,015	53,6
1,068	72,2
1,133	94,4

Flüssige Luft findet im Laboratorium sowie in der Technik zur Erzeugung tiefer Temperaturen ausgedehnte Anwendung, auch läßt sich aus Linde-Luft ein sehr hochprozentiger Sauerstoff darstellen.

13. Ozon. Sauerstoff existiert bekanntlich noch in einer allotropischen Modifikation als Ozon, dessen wissenschaftliche Erforschung ungefähr mit dem Jahre 1840 beginnt, wo Schönbein fand, daß bei der Elektrolyse des Wassers ein Stoff entstand, der stärker oxydierende Eigenschaften besaß als Sauerstoff. Die Geschichte des Ozons ist jedoch wesentlich älter und geht auf die Beobachtung van Marums (1785) zurück, daß die Luft in der Nähe von in Betrieb befindlichen Elektrisiermaschinen einen stechenden Geruch annehme. Schönbein hielt den Stoff zuerst für ein höheres Oxyd des Wasserstoffs, Marignac und Delarive erkannten seine eigentliche Natur, v. Babo und Soret verdankt man die ersten Dichtebestimmungen des Ozons. Aus später zu erörternden Gründen wurde Ozon auch negativ-(elektrisch-)aktiver Sauerstoff ge-

nannt; alle Versuche einen positiv-(elektrisch-)aktiven Sauerstoff, zeitweilig Antozon genannt, darzustellen, sind gescheitert, so daß dessen Nichtexistenz wohl sicher steht.

Die Darstellung eines vollkommen reinen 100%igen Ozons scheint noch nicht gelungen zu sein.

Die wichtigsten Bildungs- und Darstellungsweisen für Ozon (das heißt mehr oder weniger hochprozentigen ozonisierten Sauerstoff) sind folgende:

1. Einwirkung elektrischer Entladungen auf Luft oder besser reinen Sauerstoff. Die zu diesem Zwecke zuerst von Siemens konstruierten Apparate, Ozonisatoren, bestehen aus zwei konzentrischen ineinander gesetzten Glasröhren, von denen die innere auf der Innenseite, die äußere auf der Außenseite mit Stanniol belegt ist. Während der Sauerstoff durch den ringförmigen Zwischenraum hindurch strömt, werden die beiden Beläge mit den Polen eines Funkeninduktors verbunden. Dieser Apparat hat wiederholt Abänderungen erfahren, deren Aufzählung hier zu weit führen würde. Vielfach wird jetzt der Berthelotsche Ozonisator verwendet; derselbe besteht ebenfalls aus zwei ineinander gesetzten Röhren, die durch Schliffe verbunden oder miteinander verschmolzen sind; das innere Rohr wird mit Leitungswasser oder verdünnter Schwefelsäure gefüllt und das ganze Röhrensystem wird vertikal in ein Gefäß gestellt, das ebenfalls Leitungswasser oder verdünnte Säure enthält. In die Flüssigkeiten tauchen die mit dem Induktor verbundenen Elektroden (Aluminium oder Nickel). Zweckmäßig werden mehrere Ozonisatoren nebeneinander geschaltet; der zu diesem Zwecke verwendete Sauerstoff muß sehr sorgfältig getrocknet werden.

Aehnlich sind die Ozonisatoren, die nach Vorschlägen von Siemens & Halske und anderen in der Technik für die Zwecke der Trinkwasserreinigung usw. verwendet werden.

In den Ozonisatoren beginnt die Bildung des Ozons erst von einer bestimmten Spannung ab, die von der Gestalt des Apparates abhängig ist, von wesentlichem Einflusse ist die Temperatur; da diese einen beschleunigenden Einfluß auf den Ozonzerfall ausübt, werden die Ausbeuten bei tieferen Temperaturen wesentlich besser. Auch läßt sich die Ozonisierung des Sauerstoffs nur bis zu einem bestimmten Prozentsatz ausführen, da die elektrische Entladung selbst einen zerstörenden Einfluß auf das gebildete Ozon hat.

Nach Untersuchungen von Warburg ist die Ozonbildung durch Einwirkung der „dunklen elektrischen Entladungen" nicht den elektrolytischen Wirkungen, sondern den photo- und kathodochemischen Wirkungen der Entladung zuzuschreiben; was schon daraus folgt, daß kurzwellige Strahlen ozonisierend wirken.

2. Elektrolyse von Schwefelsäure. Daß bei der Elektrolyse verdünnter Schwefelsäure an Platinanoden ozonhaltiger Sauerstoff entsteht, war schon Schönbein bekannt. Nach neueren Untersuchungen von F. Fischer und seinen Mitarbeitern kann man die Elektrolyse der Schwefelsäure zu einer ergiebigen Darstellungsmethode für Ozon benutzen, die besonders dann zu empfehlen ist, wenn ein konstanter Ozongehalt benötigt wird; wesentlich für die Methode sind niedrige Temperatur, Schwefelsäure bestimmter Konzentration (ca. 1,09 spez. Gew.), gekühlte strichförmige Platinanode; es ist auf diese Weise möglich, einen über 23% Ozon enthaltenden Sauerstoff zu erzielen.

3. Autoxydation des Phosphors. Wie Schönbein entdeckte, entsteht bei der langsamen Oxydation des Phosphors bei Gegenwart von Wasser Ozon; anscheinend existiert für diese Ozonbildung ein Temperaturoptimum; durch gewisse Beimengungen wie Ammoniak, Aethylen, Aether usw. wird die Ozonbildung verringert oder ganz verhindert, die anscheinend auch mit der Leuchterscheinung bei der Phosphoroxydation genetisch verknüpft ist.

4. Einwirkung von Kathodenstrahlen und ultraviolettem Licht auf Sauerstoff (Lenard). Läßt man durch ein Geißlerrohr, das mit Sauerstoff von einigen cm Druck gefüllt ist unter gleichzeitiger Kühlung mit flüssiger Luft Entladungen hindurch gehen, so überzieht sich das Innere des Rohres mit einer dunkelblauen Haut von flüssigem Ozon.

Auch die von stark radioaktiven Stoffen ausgehenden Strahlungen bewirken Ozonisierung des Sauerstoffs.

5. Zersetzung sauerstoffhaltiger Verbindungen. Schließlich entstehen bei der Zersetzung vieler sauerstoffhaltiger Verbindungen für sich oder mit konzentrierter Schwefelsäure mehr oder weniger große Mengen Ozon; so aus BaO_2, Na_2O_2, Ag_2O_2, K_2MnO_4, $KMnO_4$, $K_2Cr_2O_7$ und H_2SO_4; ferner beim Erhitzen kristallisierter Ueberjodsäure.

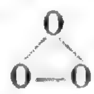
Eine interessante Bildungsweise des Ozons hat Moissan bei der Einwirkung des Fluors auf Wasser nachgewiesen; bei 0° entsteht so ein bis zu 14 Vol.-% Ozon enthaltender Sauerstoff.

Eigenschaften. Schwach ozonisierter Sauerstoff stellt ein farbloses Gas dar, das einen typischen Geruch besitzt, der an Chlor und Stickoxyde erinnert, die Gegenwart von 1 000 000-tel an Ozon in der Luft ist noch durch den Geruch wahrnehmbar. Sauerstoff mit 10% Ozon besitzt in dicken Schichten (ca. 1 m) eine bläuliche Farbe.

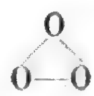
Ozon ist in Wasser wenig löslich, auch kann die Lösung mit dem Gase schwer oder überhaupt nicht ins Gleichgewicht gebracht werden, da sich Ozon bei der Berührung mit Wasser teilweise zersetzt; die wässerige Lösung zeigt die Reaktionen des gasförmigen Ozons.

Wird ozonisierter Sauerstoff im Cailletet-Apparat einem Druck von 125 Atmosphären bei unter —100° ausgesetzt, so verflüssigt sich das Ozon in Gestalt blauer Tropfen. Das flüssige Ozon ist in ca. 2 mm dicken Schichten fast undurchsichtig; einmal verflüssigt ist es auch unter Atmosphärendruck ziemlich lange haltbar; der Siedepunkt liegt hier bei ungefähr —106°; flüssiges Ozon ist sehr explosiv.

Die Dichte des Ozons (aus Gemischen von Sauerstoff und Ozon berechnet) ist auf Luft bezogen: 1,66, woraus sich die Molekulargröße von ca. 48 ergibt. Danach enthält das Ozonmolekül drei Atome Sauerstoff. Wie diese im Molekül gebunden sind, läßt sich, wie auch bei anderen nicht kompliziert zusammengesetzten Verbindungen, nicht mit Sicherheit angeben. Die Formel mit gleichartiger Bindung der Atome:



scheint auf Grund mancher Reaktionen des Ozons weniger wahrscheinlich als etwa die Strukturformel:



oder eine ähnliche.

Desozonisierung. Ozon wandelt sich schon bei gewöhnlicher Temperatur langsam in Sauerstoff um; die Zersetzung wird durch viele Stoffe, Platinschwamm, Hyperoxyde des Mangans, Bleis, Nickels u. a. katalytisch beschleunigt. Auch wässerige Lösungen von Calcium- und Baryumhydroxyd sowie festes Aetzkali und Natronkalk bewirken mehr oder weniger rasche Desozonisierung.

Der Formel $2O_3 = 3O_2$ entsprechend verläuft die Zersetzung des Ozons unter Volumvergrößerung, deren Beobachtung man auch zum Zweck einer Gehaltsbestimmung des Sauerstoffs an Ozon verwenden kann.

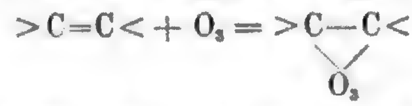
Die Ozonzersetzung ist nach Versuchen von Warburg u. a. ein Vorgang zweiter Ordnung; eine Temperaturerhöhung um 10° erhöht die Geschwindigkeit der Desozonisierung auf das 2,5-fache; bei gewöhnlicher Temperatur ist die Geschwindigkeit sehr klein.

Ein 6- bis 8-prozentiges Ozon ist ein äußerst kräftig wirkendes Oxydationsmittel, dessen Wirkung in der Regel durch Spuren von Wasser beschleunigt wird. Phosphor wird zu phosphoriger Säure und Phosphorsäure, schweflige Säure zu Schwefelsäure, Schwefelwasserstoff zu Schwefel und Wasser, Phosphor unter Lichtentwickelung zu phosphoriger und Phosphorsäure, Stickstoff zu salpetriger und Salpetersäure oxydiert, aus Chlor-, Brom- und Jodwasserstoff werden die Halogene in Freiheit gesetzt.

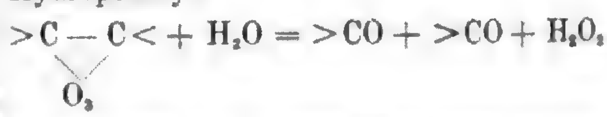
Die Metalle, ausgenommen Gold und die Platinmetalle werden von Ozon oxydiert, wobei meist sofort die höchsten Oxydationsstufen gebildet werden. Die Oxydulsalze des Zinns, Eisens, Mangans, Bleis werden zu Oxyden oder Hyperoxyden oxydiert.

Auch die Mehrzahl der organischen Verbindungen werden von Ozon weitgehend oxydiert, häufig vollständig verbrannt; Indigo wird entfärbt unter Umwandlung in Isatin, Guajaktinktur wird gebläut usw. Ozon greift die Schleimhäute stark an und besitzt hervorragend bakterizide Wirkungen, weshalb es vielfach zu Desinfektionen und Sterilisationen benutzt wird.

Nach den Untersuchungen von Harries geht bei ungesättigten Verbindungen der Oxydation die Bildung der sogenannten Ozonide voraus, indem sich das Ozonmolekül an die Doppelbindung anlagert:

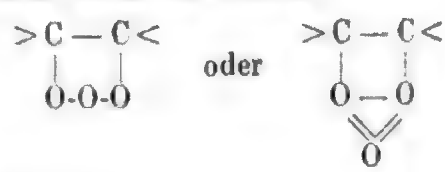


Die Ozonide sind farblose oder hellgrüne amorphe Stoffe oder dicke Oele, die zum Teil äußerst explosiv sind. Beim Behandeln mit Wasser zerfallen sie meist unter Bildung von 2 Molekülen Ketoverbindungen und Hydroperoxyd:



Doch sind auch andere Zersetzungsweisen bekannt.

Die Struktur dieser für die Zwecke der Konstitutionsbestimmung bei ungesättigten Verbindungen wichtigen Ozonide wird wahrscheinlich durch die Formel



ausgedrückt.

Nachweis und Bestimmung des Ozons. Der Nachweis des Ozons ist häufig verhältnismäßig schwierig zu erbringen, da Hydroperoxyd, salpetrige Säure und andere Oxydationsmittel in vielen Fällen ähnliche Reaktionen geben. Die Reaktion mit Jodkaliumstärkepapier ist deshalb nur bei Abwesenheit jener Stoffe zum Ozonnachweis brauchbar.

Ein sicheres, aber nicht sehr empfindliches Reagens auf Ozon ist metallisches Silber, das durch Bildung von Superoxyd Ag_2O_2 geschwärzt wird.

Das von Engler empfohlene Reagens, das für Hydroperoxyd und salpetrige Säure unempfindlich aber nicht bei Gegenwart von Chlor und Ammoniak anwendbar ist, besteht aus mit einer konzentrierten Lösung von Manganchlorür getränktem Papier, das bei Gegenwart von Ozon gebräunt wird.

Auch eine größere Zahl von organischen Verbindungen, Benzidin u. a. sind zum Ozonnachweis empfohlen worden.

Die Bestimmung des Ozons geschieht am einfachsten, indem man ein bestimmtes Volumen des ozonisierten Sauerstoffs auf neutrale Jodkaliumlösung einwirken läßt und das ausgeschiedene Jod nach dem Ansäuern mit Thiosulfat titriert; die Reaktion erfolgt nach der Gleichung:

$$2KJ + O_3 + H_2O = O_2 + 2KOH + J_2.$$

Energetik des Ozons. Ozon ist eine endotherme Verbindung, die sich aus Sauerstoff unter Wärmeabsorption bildet, die pro gr-Mol. etwa 34000 cal beträgt. Das Gleichgewicht zwischen Ozon und Sauerstoff:

$$3O_2 \rightleftarrows 2O_3$$

das bei gewöhnlicher Temperatur so gut wie vollständig auf der O_2-Seite liegt, muß somit bei hoher Temperatur zugunsten der Ozonbildung verschoben werden. Daß sich unter diesen Umständen also rein thermisch tatsächlich Ozon bildet, ist exakt von F. Fischer nachgewiesen, der Luft gegen einen glühenden Nernststift streichen ließ; unter geeigneten Bedingungen der Strömungsgeschwindigkeit sind bei diesen Temperaturen (ca. 2200°) merkliche Mengen von Ozon nachweisbar.

Ozon ist elektromotorisch ein starkes Oxydationsmittel; in der Kette:

$$Pt \left\{ \begin{matrix} O_2 \\ O_3 \end{matrix} \right\} \bigg| \, n\text{-}H_2SO_4 \, \bigg| \, O_2 \, Pt$$

ist die Ozonelektrode positiv.

Die tatsächlich beobachteten E.K. der Ozon-Sauerstoffketten zeigen jedoch nicht die von Theorie geforderte Abhängigkeit von der Ozonkonzentration und sind zur Berechnung der freien Energie der Reaktion $2O_3 \leftrightarrows 3O_2$ nicht brauchbar. Auf Umwegen ist es jedoch gelungen, das Potential der O_3-Elektrode annähernd zu bestimmen. Wird die E.K. der O_3-H_2-Kette, in der sich der Vorgang: $O_3 + H_2 = H_2O + O_2$ abspielt, bei 0° zu 1,90 Volt angenommen, so berechnet sich die Konstante K des Ozonzerfalls zu

$$\log K = \frac{7500}{T} + 0{,}88 \log T - 5{,}6 \text{ (Jahn)}$$

(T absolute Temperatur). Auf Grund dieser Beziehung sind die Ozonpartialdrucke π zu berechnen, die sich bei verschiedenen Temperaturen für das Gleichgewicht zwischen Ozon und Sauerstoff von Atmosphärendruck ergeben:

T°	1000°	1800	2200
π Atm.	0,000029	0,038	0,18

Bei den vorher erwähnten Versuchen von F. Fischer sind indes diese Ozonkonzentrationen aus naheliegenden Gründen praktisch nicht erreicht worden.

14. Spektroskopisches. Sauerstoff gibt im Plückerrohr ein Linien- oder Bandenspektrum je nach der Art der Entladung, Dichte des Gases usw. Das Linienspektrum entsteht, wenn man in den Stromkreis eine Funkenstrecke und Kapazität einschaltet. Von dem Linienspektrum verschieden ist das Spektrum, welches das ohne Funkenstrecke erzeugte Bandenspektrum begleitet (Compoundspektrum) und das nach verschiedenen Untersuchungen ein Serienspektrum darstellt. Im Linienspektrum sind folgende Linien (in $\mu\mu$) bemerkenswert:

617,1 (orange) 521 492 (grün) 470,6—464,9 446,7 441,8 (blau) 434,8 431,8 (indigo) 423—418 411,9 408 (violett).

Ferner gibt gasförmiger Sauerstoff ein Bandenspektrum bei der Absorption. Sehr stark komprimierter Sauerstoff oder solcher von 6 Atmosphären und einer Schichtdicke von 50 bis 60 m liefert Banden im Rot, Gelbgrün und Blau. Gewisse dunkle Linien im Sonnenspektrum, tellurische Linien, verdanken zum Teil dem Absorptionsvermögen des Sauerstoffs ihre Entstehung. Flüssiger Sauerstoff zeigt im wesentlichen dasselbe Absorptionsspektrum wie gasförmiger.

Ozon besitzt starkes Absorptionsvermögen für langwellige Strahlen. Das Absorptionsspektrum des gasförmigen und (blauen) flüssigen Ozons ist ein Bandenspektrum, in dem die Banden 609,5—593,5 und 577,0—650,0 $\mu\mu$ besonders charakteristisch sind. Nach Hartley soll die plötzliche Begrenzung des Sonnenspektrums im Ultraviolett auf die Absorption der Strahlung durch das in der Atmosphäre vorhandene Ozon bedingt sein.

Literatur. *Gmelin-Krauts Handbuch der anorganischen Chemie, 1907. — Dammer, Handbuch der anorganischen Chemie. — Siehe ferner die neueren Bände der Zeitschrift für anorganische Chemie und der Zeitschrift für physikalische Chemie.*

H. Ley.

b) Schwefel.

Sulphur: S. Atomgewicht: 32,07.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Formarten und allotrope Modifikationen. 6. Allgemeines chemisches und elektrochemisches Verhalten. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Photochemie. 10. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht: 32,07 (Internationale Atomgewichtskommission 1913). Maßgebend für die Wahl eines Atomgewichts ca. = 32 sind folgende Gründe: Die Dichte der gasförmigen S-Verbindungen ergibt in keinem Fall ein kleineres Aequivalentgewicht als 32, das daher als Atomgewicht zu betrachten ist; dieser Wert stellt den S zwischen P = 31 und Cl = 35,5; im periodischen System kommt er so in die zweite Reihe der Gruppe VI zu stehen, wo er sich zwischen O einerseits, Se und Te andererseits nach seinem ganzen chemischen Verhalten natürlich einreiht. Seine Verbindungen sind mit den entsprechenden des Se, Cr, Mo, Wo, Mn, in einigen Fällen auch mit denen des Te isomorph. Dem Dulong-Petitschen Gesetz entsprechend ist bei Annahme eines Atomgewichts von 32 die Atomwärme annähernd gleich 6 (5,5 für die rhombische, 5,7 für die monokline Modifikation).

Die erste ziemlich ungenaue Atomgewichtsbestimmung rührt von Berzelius her, der aus der Feststellung des Gewichtsverhältnisses, in welchem O und S von gleichen Mengen Pb zu PbO und PbS gebunden werden, Zahlen von 31,90 bis 32,5 ableitete. Später lieferte ihm die Verwandlung von Pb in $PbSO_4$ den Wert 32,186, welcher, mit dem heute geltenden Atomgewicht des Pb neu berechnet zu 32,05 wird, nahe gleich dem richtigen Wert. Stas fand aus 5 Synthesen von Ag_2S und 6 Reduktionen von Ag_2SO_4 die Zahl 32,074; Neuberechnung seiner Zahlen durch Thomson ergab 32,0606. Die exakteste neuere Untersuchung über das Atomgewicht des S führte Richards durch; seine Methode bestand in der Ueberführung von Ag_2SO_4 in AgCl. Zehn Versuche ergaben bei Annahme von Ag = 107,88 im Mittel S = 32,069. Aus der Bestimmung der Dichte von SO_2 und H_2S und Reduktion auf den idealen Gaszustand (Methoden von Guye und D. Berthelot) wurden Zahlen abgeleitet, die mit den analytisch bestimmten in bester Uebereinstimmung stehen; Leduc fand 32,056, Guye 32,065.

2. Vorkommen. S ist ein in der Natur sehr verbreitetes Element. Nach Clarke besteht die Erdoberfläche (inklusive Meer und Atmosphäre) zu 0,04% aus S. Er findet sich im freien, wie im gebundenen Zustand.

Als Element a) kristallinisch: In vulkanischen Gegenden, entstanden aus H_2S (Schwefelwasserstoff) durch Oxydation mittels des Luftsauerstoffs oder durch Umsetzung mit dem gleichzeitig sich bildenden SO_2 (Schwefeldioxyd) nach der Gleichung: $2H_2S + SO_2 = 2H_2O + 3S$. Auch in nichtvulkanischen Gegenden kann durch Reduktion von Sulfaten und Oxydation des gebildeten H_2S freier S entstehen. Hauptfundorte sind Sizilien (Girgenti), Vulcano, Island, Japan, Luisiana in Nordamerika. Aus FeS_2 (Pyrit) durch Verwitterung entstanden findet er sich in den Gruben von Rio Tinto in Spanien. — b) amorph: In den Zellen gewisser niedriger Organismen wird S in amorpher Gestalt abgelagert. Manche Algen (z. B. oscillatoria, ulothrix) und Bakterien (z. B. beggiatoa) zeichnen sich durch hohen Gehalt an S aus. Die Moore von Franzensbad und Eger enthalten 5% bzw. 11% S teils in freiem, teils gebundenem Zustand, der von der Tätigkeit von Schwefelbakterien herrührt.

Im gebundenen Zustand: Als H_2S in vulkanischen Gasexhalationen; in Schwefelquellen; der H_2S-Gehalt der letzteren stammt meist aus reduzierten Sulfaten. Sehr verbreitet sind auch Sulfide der Metalle und verwandte S-Verbindungen (Kiese, Glanze, Fahlerze, Blenden), da sie sich überall bilden, wo H_2S-haltige Wässer mit Metallsalzlösungen in Berührung treten. Als SO_2 kommt S ebenfalls als Exhalation und in Quellen in vulkanischen Gegenden vor, ferner in der Atmosphäre der Städte, gebildet durch Verbrennung des in der Kohle stets vorhandenen Schwefelkieses. Salze der Schwefelsäure (H_2SO_4) sind weit verbreitet; das Meerwasser enthält beträchtliche Mengen schwefelsaurer Salze gelöst; daher finden sich in den verschiedensten geologischen Formationen Lager von $CaSO_4.2H_2O$ (Gips) und $CaSO_4$ (Anhydrit). Endlich spielt S auch in der organischen Natur eine wichtige Rolle; die lebende Substanz enthält S als integrierenden Bestandteil; der S-Gehalt der verschiedenen Eiweißarten schwankt von 0,3% bis 2,4%.

Freier S wirkt als Gift auf viele niedere Organismen, worauf seine Verwendung zur Bekämpfung von Traubenkrankheiten beruht. In der Medizin findet er innerliche und äußerliche Anwendung gegen Hautkrankheiten. Ueber das physiologische Verhalten seiner Verbindungen siehe bei diesen; starke Gifte sind besonders H_2S und SO_2.

3. Geschichte. Schon in der ältesten Zeit war der Schwefel bekannt und diente als Räucher- und Arzneimittel. In den Theorien der Alchimisten spielte S eine große Rolle als das Prinzip der Veränderlichkeit durch Feuer. Er galt als ein Grundstoff,

der einen Bestandteil der Metalle bilde; auf den Gehalt an S wurde die Verbrennlichkeit der Metalle zurückgeführt, während die metallischen Eigenschaften einem Gehalt an Hg zugeschrieben wurden. Diese Ansicht wird schon von Geber vertreten und findet sich in mehr oder weniger großen Variationen bis Paracelsus. Erst van Helmont und Boyle traten entschieden gegen diese Lehre auf. Zur Zeit der Phlogistontheorie wurde S als Verbindung einer Säure mit Phlogiston angesehen. Nach den Versuchen Lavoisiers über die Oxydation wurde er als Element erkannt, aber noch 1819 wurde er von Davy für einen zusammengesetzten harzartigen Körper gehalten.

Schwefel findet heute ausgedehnte technische Anwendung, zur Darstellung von Schießpulver, zum Vulkanisieren des Kautschuks und der Guttapercha, zur Herstellung von Ultramarin und von vielen anderen S-Verbindungen. Er dient ferner als Arzneimittel und zur Bekämpfung von Traubenkrankheiten (Oidium Tuckeri). Die Verbindungen des S besitzen zum Teil größere technische Bedeutung als der freie S. Besonders Schwefelsäure (H_2SO_4) ist von außerordentlicher Wichtigkeit für die gesamte chemische Technik.

4. Darstellung. Die Darstellung des Schwefels ist sehr einfach. In Sizilien, welches den weitaus größten Teil der Weltproduktion liefert, wird das schwefelhaltige Gestein in meilerartige Haufen, „Calcaroni" genannt, geschichtet und angezündet; der verbrennende S, etwa der vierte Teil des gesamten, schmilzt die Hauptmenge aus, die unten abfließt. Wegen der schädlichen Wirkung des sich dabei massenhaft entwickelnden SO_2 auf die Vegetation darf dieser Prozeß während der Blütezeit nicht betrieben werden. Einer allgemeineren Verwendung der Kohle als Brennmaterial steht in Sizilien deren hoher Preis entgegen. In Luisiana wird das anstehende Gestein unter Tag durch überhitztes Wasser ausgeschmolzen. Beträchtliche Mengen S werden in England heute noch aus den Rückständen der (allmählich verschwindenden) Sodafabrikation nach Leblanc gewonnen; kleinere Mengen werden aus Pyrit und anderen Kiesen durch partielles Abrösten dargestellt.

Der Rohschwefel wird durch Destillation gereinigt. Bei langsamem Arbeiten schlägt sich hierbei der S in Gestalt von feinsten Kristallen nieder und bildet dann die Schwefelblumen des Handels. Bei schneller Destillation erwärmen sich die Vorlagekammern so weit, daß der Dampf sich zu flüssigem S verdichtet, der durch Gießen in geeignete Form gebracht wird; er kommt in Brocken-, Stangen- und Fadenform in den Handel.

5. Formarten und allotrope Modifikationen. Die Fähigkeit des S, in allotropen Modifikationen aufzutreten, ist von Mitscherlich entdeckt worden. Seither sind zu den von ihm charakterisierten Modifikationen, der rhombischen und der monoklinen, noch eine Anzahl weiterer gekommen. Die wichtigsten derselben sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt, einige weitere, zum Teil weniger genau bekannte, sind weggelassen.

Symbol	Eigenschaften	Stabilität
S_I	rhombisch	stabil bis 95,5°
S_{II}	monoklin	stabil über 95,5°
S_{III}	perlmutterartig monoklin	labil
S_{IV}	monoklin	sehr labil
S_λ	amorph, in CS_2 löslich	in der Schmelze im Gleichgewicht; unterhalb des Erstarrungspunktes labil.
S_μ	amorph, in CS_2 unlöslich	

S_I, rhombischer Schwefel, auch oktaedrischer Schwefel genannt, ist die unterhalb 95,5° allein stabile Modifikation. In S_I wandeln sich daher alle anderen Modifikationen bei Zimmertemperatur schließlich um, wenn auch die Geschwindigkeit dieser Umwandlung häufig sehr klein ist. Als S_I findet sich S auch fast ausschließlich in der Natur. Aus dem Schmelzfluß bildet er sich gewöhnlich nicht direkt, sondern durch Umwandlung aus der oberhalb 95,5° zunächst auskristallisierenden monoklinen Form. Direkt bildet er sich durch Auskristallisieren aus Lösungen und bei langsamer Abscheidung des S aus Verbindungen bei Zimmertemperatur.

S_I bildet rhombische Kristalle von gelber Farbe, welche beim Erwärmen dunkler wird, beim Abkühlen auf −50° fast verschwindet. Achsenverhältnis a:b:c = 0,8130:1:1,9037. Die gewöhnliche Ausbildung entspricht einer rhombischen Pyramide oder deren Kombination mit (11$\bar{3}$), (001), auch (011). Zwillinge kommen vor mit der Zwillingsebene (101), (110) oder (011). Unvollkommene Spaltbarkeit nach (001) und (110). Die Kristalle sind spröde, der Bruch uneben oder splitterig; die Härte beträgt 1,5 bis 2,5 nach der Mohsschen Skala. Dichte d_4^{17} = 2,070 für Kristalle aus Sizilien. Idealer Schmelzpunkt 112,8° (s. auch unter flüssigem S). Durch Druck wird der Schmelzpunkt erhöht; die zusammengehörigen Werte sind nach Tammann:

kg/cm²	t°
199	120,9
534	129,9
914	141,1
1320	151,1
1551	156,1
1838	163,1
2149	170,1
2650	180,1
3143	190,1

Schmelzwärme 9,37 cal pro g S.

Spezifische Wärme nach Nernst bei:

— 250°	0,0300
— 690°	0,0835
— 71°	0,1520.

Mittlere spezifische Wärme zwischen 0° und 32°: 0,1719, zwischen 14° und 99°: 0,1776.

Mittlerer linearer Ausdehnungskoeffizient bei 40°: 6413.10^{-8}.

Wärmeleitvermögen bei:

0°	$0{,}700.10^{-3}$	$\frac{\text{cal}}{\text{cm sec grad}}$
— 190°	$1{,}522.10^{-3}$	„ „ „

Der spezifische elektrische Widerstand ist sehr groß, mindestens 10^{25} c-g-s-Einheiten: S ist ein ausgezeichneter Isolator. Durch Belichten wird der Widerstand erheblich verkleinert, ähnlich wie beim Selen. Auch Verunreinigungen vermindern die Isolationsfähigkeit des S.

Optisches Verhalten: Stark doppelbrechend, positiv; die Ebene der optischen Achsen ist parallel (010). Brechungsindex für die D-Linie: $n_\alpha = 1{,}95047$, $n_\beta = 2{,}03837$, $n_\gamma = 2{,}24052$. Dielektrizitätskonstante für unendlich lange Wellen $DK_\alpha = 3{,}81$, $DK_\beta = 3{,}97$, $DK_\gamma = 4{,}77$. Magnetisches Verhalten: Diamagnetisch.

Rhombischer S ist leicht löslich in CS_2 (Schwefelkohlenstoff); 100 Teile CS_2 lösen bei:

— 11°	16,54	Teile S
— 6°	18,75	„ „
0°	23,99	„ „
15°	37,15	„ „
18,5°	41,65	„ „
22°	46,05	„ „
38°	94,57	„ „
48,5°	146,21	„ „
55°	181,34	„ „

In folgenden Lösungsmitteln ist S_I erheblich löslich: Alkohol, Aether, Methylenjodid, Benzol, Toluol, Chloroform, Phenol, Anilin, Benzylchlorid, Petroleum, weißer Phosphor. Merklich löslich ist S_I auch in warmer konzentrierter Essigsäure. Aus Lösungen in Aethyl- oder Methylalkohol scheidet sich S beim Erwärmen über die kritische Temperatur des Lösungsmittels nicht aus.

S_{II}, monokliner Schwefel, entsteht aus S_I beim Erwärmen über 95,5° oder durch Kristallisation aus dem Schmelzfluß oberhalb dieser Temperatur. S_{II} bildet monokline Kristalle von prismatischem Habitus mit dem Achsenverhältnis a:b:c = 0,99575: 1:0,99983, β = 84° 14'.

Die Farbe der durch Erstarren erhaltenen Kristalle ist bräunlich gelb, bei Vorhandensein von geringen organischen Beimengungen dunkler; die Dichte ist geringer als die von S_I; $d_4^{17} = 1{,}958$.

Spezifische Wärme nach Nernst bei:

	— 190°	0,0826
	— 72°	0,1498
mittlere zwischen	— 76° und 0°	0,1612
mittlere zwischen	— 0° und 33°	0,174

Idealer Schmelzpunkt 119,25° (s. auch unter flüssigem S). Schmelzwärme 10,4 cal pro g S_{II}. Kubischer Ausdehnungskoeffizient 27.10^{-5} bei 15°. — S_I und S_{II} stehen zueinander im Verhältnis der physikalischen Isomerie, denn sie liefern identische Schmelzflüsse, Lösungen und Dämpfe (vgl. über die hier maßgebenden Verhältnisse den Artikel „Isomerie"). Sie sind enantiotrop, da oberhalb 95,5° S_{II}, unterhalb dieser Temperatur S_I die stabile Modifikation darstellt. Bei 95,5° selbst sind beide Formen miteinander im Gleichgewicht und können beliebig lange nebeneinander bestehen. Die Umwandlungsgeschwindigkeiten beider Formen ineinander sind im allgemeinen klein; man kann sowohl S_I wie S_{II} auch außerhalb ihres Stabilitätsgebietes ohne Mühe längere Zeit beobachten. Daher läßt sich aus der Schmelze auch durch Impfen mit Kristallen von S_I oder S_{II} willkürlich Kristallisation nach der einen oder anderen Form erzielen. Die Kristalle von S_{II} werden bei gewöhnlicher Temperatur im Lauf einiger Tage blaß, trübe und zerreiblich und bestehen dann aus S_I-Kriställchen Die Umwandlung wird beschleunigt durch Berührung mit Keimen der stabilen Modifikation, auch durch Belichtung. Stark beschleunigend wirkt auch Berührung mit einem Lösungsmittel. Nach den Prinzipien der Thermodynamik muß (bei physikalischer Isomerie) die instabile Form leichter löslich sein als die stabile, d. h. ein Lösungsmittel in Berührung mit S_I und S_{II} ist dauernd in bezug auf S_I übersättigt und dieser scheidet sich aus, während S_{II} in Lösung geht.

Dabei muß das Verhältnis der Löslichkeiten von S_{II} und S_I in verschiedenen Lösungsmitteln bei der gleichen Temperatur eine konstante Zahl sein, wie Brönsted tatsächlich fand. Bei 25,3° ist $\frac{L_{II}}{L_I} = 1{,}28$ (wenn L_{II} und L_I die Löslichkeit von S_{II} und S_I bedeuten) für Lösungen in Benzol, Chloroform, Aether, Aethylbromid. Nach der thermodynamischen Gleichung: $A = 1{,}99\ T \ln \frac{L_{II}}{L_I}$ läßt sich aus der Bestimmung

von $\frac{L_I}{L_{II}}$ bei verschiedenen Temperaturen die Umwandlungsaffinität A für die Reaktion $S_{II} \rightarrow S_I$ berechnen. Nach dieser Methode findet Brönsted:

t°	0	15,5°	25°
A in cal	0,718	0,639	0,569
t°	95,5°	120°	150°
A in cal	0	— 0,2082	— 0,4359

Die Umwandlungswärme, die bei 95,5° beim Uebergang von S_I in S_{II} absorbiert wird, wird zu 2,52 bis 3,3 cal pro g S angegeben.

Nicht unter allen Umständen sind S_I und S_{II} enantiotrop. Durch Druckerhöhung wird die Lage des Umwandlungspunktes verschoben, und zwar in folgender Weise:

kg/cm²	Umwandlungstemperatur (° C)
123	100,1
391	110,1
638	120,0
837	129,9
1108	140,1
1350	150,1

Bei Vergleich mit den früher gegebenen Werten für die Aenderung der Schmelztemperatur des S_I mit dem Druck sieht man, daß etwa bei 151° und 1320 kg ein Tripelpunkt liegt, bei welchem S_I, S_{II} und Schmelze im Gleichgewicht sind, und daß bei noch höheren Drucken S_I bis zu seinem Schmelzpunkt stabil, S_{II} also bei allen Temperaturen instabil ist; wir haben dann Monotropie.

S_{III}, „Soufre nacré", entdeckt von Gernez, monokline, schwach gelblichweiße, perlmutterglänzende Blättchen, Kristalle von dem Achsenverhältnis a:b:c = 1,06094:1:0,70944, β = 88° 13′. Täfelchen nach der Symmetrieebene. Idealer Schmelzpunkt 106,8° (siehe auch unter flüssigem S). Er wird bei Abscheidung des S auf chemischem Wege erhalten, besonders leicht bei langsamer Diffusion wässeriger Lösungen von Natriumthiosulfat und $KHSO_4$ ineinander. Auch aus unterkühltem flüssigem S läßt sich S_{III} durch Reiben der Glaswand mit dem Glasstab zum Auskristallisieren bringen. S_{III} ist unter allen Umständen instabil und wandelt sich, je nach der Temperatur in S_I oder S_{II} um. Man kennt Mischkristalle von S_{III} mit bis zu 66% Se.

S_{IV} bildet sich am besten aus an S gesättigtem alkoholischem $(NH_4)_2S$, das mit der vierfachen Menge Wasser verdünnt, in einem hohen Zylinder der Einwirkung der Luft bei 5° ausgesetzt wird.

Sehr unbeständige, optisch zweiachsige, schwach doppelbrechende Kristalle, wahrscheinlich dem monoklinen System angehörig.

Engels rhomboedrische Modifikation: Darstellung durch Vermischen von konzentrierter Salzsäure und Natriumthiosulfatlösung, Ausschütteln mit Chloroform, ehe Abscheidung eintritt, und Verdunsten. Orangegelbe Kristalle, gewöhnlich von prismatischem Habitus, optisch zweiachsig, negativ, wandelt sich allmählich in S_I um.

Friedels trikliner Schwefel. Eine trikline Modifikation hat Friedel im oberen Teil eines Schwefelbades bei einer Dampfdichtebestimmung nach V. Meyer beobachtet. Die Kristalle wandelten sich rasch in S_I um. — Eine Zusammenstellung über diese und einige weitere kristallisierte Schwefelmodifikationen siehe bei R. Brauns (Neues Jahrbuch der Mineralogie 1900).

Schwarzer Schwefel. Sogenannter schwarzer S entsteht aus gewöhnlichem S durch Erhitzen mit geringen Mengen organischer Substanzen. Schon der Staub aus der Luft kann mißfarbigen S erzeugen.

Blauer Schwefel. Beim Mischen von $FeCl_3$-Lösung mit Schwefelwasserstoffwasser wird die Flüssigkeit im ersten Moment tiefblau, scheidet aber gleich darauf weißen S ab. Durch Erwärmen einer Lösung von S_2Cl_2 in Benzol, Toluol oder CS_2 mit ZnS oder CdS bildet sich grünes Schwefelpulver, das allerdings keinen reinen S darstellt, sondern etwa 5% Rückstand beim Verbrennen liefert.

Schwefel im amorphen und flüssigen Aggregatzustand: S_λ und S_μ. Amorpher Schwefel wird regelmäßig erhalten bei rascher chemischer Abscheidung des S aus seinen Verbindungen, z. B. bei der Zersetzung von $Na_2S_2O_3$ (Natriumthiosulfat) oder Na_2S_5 (Natriumpolysulfat) durch Säuren. Es entspricht dies der Ostwaldschen Stufenregel, welche aussagt, daß bei chemischen oder physikalischen Vorgängen häufig zunächst der mit dem geringsten Verlust an freier Energie verbundene Vorgang eintritt, also ein unter den herrschenden Bedingungen noch instabiles System sich bildet (amorpher S), welches erst nachträglich in das stabile (S_I) übergeht. Der auf chemischem Wege erhaltene amorphe S stellt eine zähe gelbe Masse dar, welche im Lauf einiger Tage fest wird. Durch Behandeln mit CS_2 läßt sich der amorphe S in 2 Teile zerlegen, einen löslichen S_λ und einen unlöslichen S_μ. Der bei der Extraktion mit CS_2 zurückbleibende S_μ ist ein hellgelbes Pulver von der Dichte 2,046. Beide Modifikationen des amorphen S werden bei der Abscheidung des S aus seinen Verbindungen stets nebeneinander gebildet, jedoch in wechselnden Mengenverhältnissen; die Zersetzung von Polysulfid z. B. liefert hauptsächlich S_λ, von Thiosulfat hauptsächlich S_μ. Es ist trotz der darauf verwandten Arbeit noch eine ungelöste Frage, von welchen Bedingungen diese Verhältnisse beherrscht werden.

Eine dritte amorphe Modifikation, deren Existenz früher behauptet wurde, soll sich

zunächst in CS_2 lösen, beim Abdampfen jedoch unlöslich werden. Es handelt sich dabei wahrscheinlich nur um eine kolloidale Lösung von S_μ in CS_2.

S_λ und S_μ sind bei Zimmertemperatur beide instabil. S_λ wandelt sich schon im Lauf einiger Tage vollständig in S_I um, S_μ viel langsamer; noch nach Jahren ist er nicht vollständig in S_I übergegangen. Sehr schnell geht die Umwandlung von S_μ vor sich bei Berührung mit Schwefelwasserstoffwasser, Kochen mit Alkohol oder Erhitzen.

Die Umwandlung $S_\lambda \rightarrow S_I$ entwickelt eine Wärme von 11,2 cal pro g, $S_\mu \rightarrow S_I$ eine solche von 22,5 bis 28,5 cal.

Ein Gemisch von S_λ und S_μ wird auch erhalten beim Abschrecken von flüssigem S; gießt man flüssigen S in dünnem Strahle in kaltes Wasser, so bildet er kautschukartig elastische Fäden von gelber bis rotbrauner Farbe (je nach der Temperatur, bis zu welcher die Schmelze erhitzt war): sogenannter plastischer Schwefel. Je nach den Bedingungen enthält er S_λ und S_μ in wechselndem Verhältnis. Nach einigen Tagen wird er fest durch die Umwandlung des S_λ in S_I.

Da der plastische Schwefel offenbar einfach den unterkühlten Schmelzfluß des S darstellt, so liegt es nahe, das Nebeneinanderbestehen von S_λ und S_μ auch in der Schmelze anzunehmen. Dem entspricht in der Tat das Verhalten des geschmolzenen S.

Der beim Erhitzen über 95,5° gebildete S_{II} schmilzt bei 119,25° zu einer gelbroten, leicht beweglichen Flüssigkeit von der Dichte 1,80. Spezifische Wärme bei 110° = 0,23. Dieselbe wird bei Steigerung der Temperatur dunkler rot und zäher. Die stärkste Viskositätszunahme findet in der Gegend von 170° in einem relativ engen Temperaturintervall statt. Die Flüssigkeit wird schließlich so zähe, daß sie bei umgekehrtem Gefäß nicht mehr ausfließt. Maximum der Viskosität zwischen 170° und 220°. Oberhalb 250° wird die Schmelze wieder dünnflüssig, bleibt aber dunkelrot bis zum Siedepunkt 444,5°. Die optische Absorption reicht vom violetten Ende des Spektrums her bei 250° bis 300° bis 620 $\mu\mu$.

Dieses Verhalten deutet auf eine Umwandlung in der Flüssigkeit hin, welche als ein mit der Temperatur sich verschiebendes Gleichgewicht zwischen 2 chemisch isomeren Formen des geschmolzenen S in homogener Phase gedeutet werden muß. Je höher die Schmelze erhitzt war, desto größer ist die beim Abschrecken gebildete Menge des S_μ. Daher ist S_μ mit der zähflüssigen, S_λ mit der dünnflüssigen Modifikation zu identifizieren: S_λ und S_μ sind die unterkühlten flüssigen Isomeren. Die aus S_I und S_{II} entstehende Schmelze besteht aus S_λ-Molekülen. Daher muß der amorphe S_λ als instabile physikalisch allotrope Modifikation löslicher in CS_2 sein als S_I; in der Tat kristallisiert aus konzentrierten Lösungen von S_λ S_I aus. Das Gleichgewicht in der Schmelze stellt sich bei nicht zu hohen Temperaturen langsam ein; daraus erklärt sich die Abhängigkeit der Eigenschaften der S-Schmelzen von der Vorbehandlung. Gehalt an S_μ wirkt wie Zusatz eines fremden Stoffes erniedrigend auf den Erstarrungspunkt. Die Gefrierpunktsdepression bei Zusatz von 1 g-Atom S_μ auf 100 g S_λ beträgt nach Smith 42,5°. Man kann daher durch längeres Erwärmen der Schmelze auf eine bestimmte Temperatur t, rasches Abkühlen und Bestimmung des Erstarrungspunktes den Gehalt an S_μ bei der Temperatur t finden (Schaum, Wigand). Durch Gegenwart von SO_2 wird die Einstellung des Gleichgewichtes stark verzögert, durch NH_3 beschleunigt. Auch durch Abschrecken der Schmelze auf Zimmertemperatur und Extraktion mit CS_2 läßt sich der Gehalt an S_λ und S_μ feststellen (Smith). Beide Methoden liefern gut übereinstimmende Zahlen, wie folgende Tabelle zeigt.

t°	gS_μ auf 100 g S_λ nach Schaum	nach Smith
114,5	3,9	3,7
130	5,4	4,2
140	6,2	5,6
150	7,0	6,7

Bei Steigerung der Vorerhitzungstemperatur wird schließlich ein minimaler Erstarrungspunkt gefunden. Vermutlich ist der Grund dafür, daß bei niedrigerer Temperatur S_λ und S_μ nicht unbegrenzt mischbar sind. Gewisse Entmischungsphänomene, welche an sich abkühlenden Schwefelschmelzen beobachtet werden, würden damit im Einklang stehen.

Aus der obigen Tabelle geht hervor, daß schon in der Gegend der Schmelzpunkte der verschiedenen S-Modifikationen im Gleichgewichtszustand sich erhebliche Mengen S_μ in der Schmelze befinden. Man hat daher bei der Angabe der Schmelzpunkte zu unterscheiden zwischen dem „idealen" Schmelzpunkt, d. h. dem (metastabilen) Punkt des Gleichgewichts zwischen Kristall und der aus S_λ bestehenden Schmelze und dem sogenannten „natürlichen" Schmelzpunkt, dem (stabilen) Punkt, bei dem außerdem das Gleichgewicht in der Flüssigkeit zwischen S_λ und S_μ eingestellt ist. Die letzteren Punkte liegen natürlich etwas tiefer. Smith gibt für die Schmelzpunkte von S_I, S_{II} und S_{III} die Tabelle:

	Idealer Fp.	Natürlicher Fp.	Gehalt an S_μ in %
S_I	118,75°—119,25°	114,5	3,7
S_{II}	112,8	110,2	3,4
S_{III}	106,8	103,2	3,1

Die bei der Umwandlung von S_λ in S_μ absorbierte Wärmemenge hat Wigand aus der Verschiebung des Gleichgewichts bei Temperaturänderung zu berechnen versucht und findet für 131° — 21,3 cal pro g. Lewis und Randall geben den etwas abweichenden Wert — 13 cal an.

Das Gleichgewicht zwischen S_λ und S_μ wird durch Licht beeinflußt; bei Bestrahlung bildet sich im Schmelzfluß mehr S_μ als dem Dunkelgleichgewicht entspricht; in CS_2-Lösungen von S_λ fällt bei Bestrahlung S_μ aus. Beide Vorgänge leisten Arbeit gegen die chemische Affinität, da im Dunkeln der ursprüngliche Zustand unter Arbeitsleistung wiederhergestellt wird. Der Ausnutzungsfaktor, d. h. die zur chemischen Arbeitsleistung verwendete Lichtenergie, dividiert durch die gesamte absorbierte, wird von Wigand auf 0,04% geschätzt.

Ob der Unterschied von S_λ und S_μ in verschiedener Größe des Moleküls begründet ist, läßt sich noch nicht sicher angeben. Aus kinetischen Versuchen Schaums hat Wigand auf monomolekularen Verlauf der Reaktion $S_\mu \rightarrow S_\lambda$ und daraus weiterhin auf Gleichheit der Molekulargröße von S_λ und S_μ geschlossen. Der letztere Schluß erscheint jedoch nicht zwingend, zumal da die kryoskopische Methode (Erniedrigung des Erstarrungspunktes von S_λ durch S_μ) eher auf den Wert S_6 für S_μ zu führen scheint, während die Molekulargröße von S_λ (siehe weiter unten) mit großer Sicherheit zu S_8 anzunehmen ist.

Schwefel im Dampfzustande. In der Tabelle ist der Siedepunkt des Schwefels unter verschiedenen Drucken angegeben:

700 mm	445,5°
250	379,4°
133	352,5°
53,5	306,5°
20,5	265,0°
5,54	234,4°
1,35	210,2°

Im hohen Vakuum sublimiert S bei ca. 100°, nach Dewar sogar bei gewöhnlicher Temperatur. Die Verdampfungswärme pro g-Atom S beträgt 11580 cal bei 316°.

Das Molekulargewicht des S-Dampfes ist häufig untersucht worden, in neuerer Zeit besonders von Biltz und von Preuner.

Bei niedriger Temperatur (in gleichem Sinne wirkt hoher Druck) sind im Dampf fast ausschließlich S_8-Moleküle vorhanden; bei Temperaturen über 900° (unter geringerem Druck auch schon bei niedrigeren Temperaturen) bis ca. 1700° S_2-Moleküle; bei 2000° fand Nernst den S zu etwa 30% in Atome dissoziiert. Um die Isothermen des S-Dampfes bis 900° erklären zu können, erweist es sich als nötig, die gleichzeitige Anwesenheit von S_8, S_6, S_4 und S_2 anzunehmen. Bis 450° kommt man nach Preuner ohne Berücksichtigung von S_4-Molekülen aus. Eine Uebersicht über die Verhältnisse im gesättigten Dampf gibt folgende Tabelle (P = Spannung des gesättigten Dampfes, π = Partialdruck der beigeschriebenen Molekülarten):

t°	P	π_{S_8}	π_{S_6}	π_{S_2}
100	0,0085	0,0075	0,0010	—
150	0,23	0,1915	0,0385	—
200	2,26	1,74	0,52	—
250	12	8,4	3,6	—
300	48	30,2	17,8	—
350	128	70,5	56,5	1,28
400	378	183	187	7,2
450	828	346	450	31,6

Die Dissoziationswärmen sind:

$$3S_8 = 4S_6 - \quad 29000 \text{ cal}$$
$$S_6 = 3S_2 - \quad 64000 \text{ cal}$$
$$S_2 = 2S_1 - \text{ca. } 100000 \text{ cal.}$$

Die Verdampfungswärme von 2 g-Atomen festen S zu S_2-Molekülen beträgt 29000 cal. Alle diese Zahlen beziehen sich auf die Vorgänge bei konstantem Volumen.

Molekulargewicht des S in Lösungen: Das Molekulargewicht von $S_I = S_{II} = S_\lambda$ in Naphtalin, weißem Phosphor, Antimontrichlorid ist S_8, in Benzol S_6.

6. Allgemeines chemisches und elektrochemisches Verhalten. S gehört zu den typischen Metalloiden; seine Wasserstoffverbindung ist eine ausgesprochene Säure, seine Sauerstoffverbindungen zeigen den Charakter von Säureanhydriden. Seine Verbindungen mit den Halogenen haben nicht die Eigenschaften von Salzen und werden durch Wasser hydrolysiert. Als Metalloid bildet S nur Anionen. Immerhin ist seine Affinität zum negativen Elementarquantum nicht so groß wie bei den Halogenen; das Potential einer umkehrbaren Schwefelelektrode liegt, in normaler S''-Ionenlösung, bei —0,55 Volt (gegen die Wasserstoffnormalelektrode gemessen), d. h. es ist noch um ca. 1 Volt unedler als das Potential des schwächsten der Halogene, des J; damit hängt zusammen, daß H_2S zu den schwachen Säuren gehört. Außerdem bildet S noch eine große Zahl komplexer Ionen, besonders mit Sauerstoff die Anionen der Sauerstoffsäuren des S.

S tritt in seinen Verbindungen mit wechselnder Wertigkeit auf. Gegen Wasserstoff ist er zweiwertig (H_2S), gegen Sauerstoff, die Halogene und in organischen Verbindungen auch vier- und sechswertig (vierwertig z. B. in SO_2 und den organischen Sulfinbasen, sechswertig in SO_3 und SF_6).

In den Verbindungen, in welchen S zweiwertig auftritt, zeigt er eine große Analogie zum Sauerstoff. Fast allen Verbindungen des O lassen sich durch voll-

ständigen oder teilweisen Ersatz durch S entsprechende S-Verbindungen an die Seite stellen. Die Verbindungstypen der höheren Wertigkeitsstufen des S entsprechen denen des Se und Te, sowie des sechswertigen Cr und Mo. Die vier Valenzen des vierwertigen S sind gleichwertig, denn Sulfine vom Typus RR_1R_2SX, wo R, R_1, R_2 organische Radikale, X einen Säurerest bedeuten, existieren nur in einer Form. Smiles hat optisch aktive Sulfinbasen hergestellt, woraus hervorgeht, daß die vier Valenzen nicht in einer Ebene liegen.

Die verschiedene Wertigkeit des S in seinen Verbindungen äußert sich in der Größe seiner Atomrefraktion, welche weit davon entfernt ist, eine konstante zu sein; am ausführlichsten sind diese Fragen von Nasini und Costa untersucht worden. Außer der Wertigkeit zeigt auch die Art der Bindung einen Einfluß. Bei organischen Verbindungen mit zweiwertigem S erhält man verschiedene Werte für die Atomrefraktion, je nachdem das S-Atom mit einem einzigen oder mit zwei C-Atomen verbunden ist. Für das Licht der Wasserstofflinie H_α wird im ersten Falle gefunden 14,2 (bei Berechnung nach der Formel $\frac{n-1}{d}$) oder 7.6 (nach der Formel $\frac{n^2-1}{n^2+2}\cdot\frac{1}{d}$), im zweiten Falle 16,1 oder 9,0.

Für den vierwertigen S (in Sulfinen) ist die Atomrefraktion noch größer, ca. 18 nach der n-Formel, 10 nach der n^2-Formel. In Sauerstoffverbindungen scheint die Refraktion dagegen ganz erheblich kleiner zu sein (7 bis 9 oder 3 bis 6); genaue Zahlen lassen sich nicht ermitteln wegen der Unsicherheit der dem O zukommenden Werte. Das Atomvolumen des S zeigt ähnliche Schwankungen; es ist z. B. für S, der O im Typus H_2O oder C innerhalb eines Radikals ersetzt, = 22,6; für S, der O innerhalb eines Radikals ersetzt, = 28,6.

7. Analytische Chemie. Elementarer Schwefel ist leicht erkennbar an seinem Aussehen, seinem Geruch nach schwefliger Säure beim Verbrennen und der dabei auftretenden blauen Flamme. In Gemischen kann man freien S nachweisen durch Extraktion mit CS_2; im Fall der Gegenwart von S_μ muß derselbe durch Erwärmen auf 110° zuerst in löslichen verwandelt werden. Die kleinste Spur von S, der in irgendeinem Lösungsmittel gelöst ist, läßt sich durch Schütteln mit einem Tropfen reinem Hg nachweisen. 0,000003 mg S in 30 ccm CS_2 färben Hg noch gelblich.

In Verbindungen weist man S am leichtesten durch die Heparreaktion nach; man schmilzt die Verbindung mit Soda auf der Holzkohle· durch Reduktion wird Natriumsulfid gebildet, welches auf Ag bei Gegenwart von Wasser und Luft einen braunen Fleck von Ag_2S erzeugt. Eine andere Methode besteht im Schmelzen der Substanz mit Kali und Salpeter; dadurch werden alle Verbindungen des S in Sulfate übergeführt, welches durch den mit Bariumsalzlösungen entstehenden, in Säuren unlöslichen weißen Niederschlag von Bariumsulfat nachgewiesen wird.

Quantitativ läßt sich freier S durch Verdampfen des CS_2-Extraktes und Wägen des Rückstandes bestimmen. Die allgemeine Methode, nach welcher S im freien und gebundenen Zustand bestimmt wird, ist die Ueberführung in Schwefelsäure durch Oxydationsmittel, wie $HClO_3$, rauchende HNO_3, H_2O_2; die H_2SO_4 wird dann durch $BaCl_2$ als $BaSO_4$ gefällt, welches zur Wägung gebracht wird.

Spezielle qualitative und quantitative Methoden zur Bestimmung einzelner Verbindungen des S findet man bei diesen besprochen.

8. Spezielle Chemie. Wirkung chemischer Agenzien auf S. Mit den meisten Elementen vereinigt sich S direkt, ausgenommen die Elemente der Argongruppe, Stickstoff, Gold, Platin, Beryllium.

Mit O verbindet sich S schon bei gewöhnlicher Temperatur langsam zu SO_2, lebhafter beim Erwärmen. Ueber 200° ist die Vereinigung von Phosphoreszenz begleitet, welche ähnlichen Gesetzen folgt, wie die bei der langsamen Oxydation des Phosphors auftretende. Die Entzündungstemperatur des S liegt in Luft bei 250°. Ozon oxydiert bei Gegenwart von Wasser oder Alkali zu H_2SO_4. Mit Wasserstoff verbindet sich S ebenfalls beim Erwärmen (bei 310° noch sehr langsam aber vollständig) zu H_2S. Einwirkung auf Wasser findet selbst beim Kochen nicht statt, gegenteilige Angaben sind auf Mitwirkung des Glases zurückzuführen. Beim Schmelzen mit Alkali findet Reaktion statt nach dem Schema:

$$6NaOH + 4S = 3H_2O + Na_2S_2O_3 + 2Na_2S$$

unter Bildung von Sulfid (oder Polysulfid) und Thiosulfat.

NH_3 wird von trockenem S absorbiert; beim Erhitzen entsteht $(NH_4)_2S$ und Stickstoff. In wässerigem NH_3 ist S unlöslich. flüssiges NH_3 löst bei 20° ca. 30% S auf unter Bildung einer roten Lösung von „Sulfammonium“ (Moissan).

Viele Metalle vereinigen sich schon beim Zusammenreiben oder beim Erwärmen mit S zu Sulfiden. Im Dampfe von S verbrennt Cu mit hellem Lichte.

Beschreibung wichtiger S-Verbindungen:

Schwefelwasserstoff, H_2S. Schwefel-

wasserstoff wurde von Libavius und von Lemery bei der Zersetzung löslicher Metallsulfide entdeckt. 1777 wurde das Gas eingehend von Scheele untersucht, von dem auch die noch heute üblichen Darstellungsweisen herrühren. Im Jahre 1796 zeigte Berthollet, daß H_2S als eine sauerstoffreie Säure aufzufassen ist.

Vorkommen: In vulkanischen Gasen, in Schwefelquellen (z. B. Aachen, Langenbrücken, Landeck, Burtscheid), herrührend von vulkanischer Tätigkeit oder durch Reduktion aus Sulfaten, besonders $CaSO_4 . 2H_2O$ (Gips) oder $CaSO_4$ (Anhydrit) entstanden. Regelmäßig tritt H_2S durch Vermittlung von Bakterien beim Faulen organischer Substanzen auf.

Darstellung: Die gewöhnliche Darstellungsmethode beruht auf der Zersetzung von FeS (erhalten durch direkte Vereinigung von Fe und S) durch Säuren:

$$FeS + 2HCl = FeCl_2 + H_2S.$$

Das Gas, das auf diesem Wege erhalten wird, enthält meist Wasserstoff beigemengt, weil das FeS gewöhnlich noch unverbundenes Eisen enthält. An sonstigen Verunreinigungen enthält das Gas hauptsächlich AsH_3 und PH_3. Um reines H_2S zu erhalten, bedient man sich statt des FeS der chemisch rein dargestellten Sulfide von Na, Ca, Zn oder auch Sb.

Aus den Elementen bildet sich H_2S bei niedriger Temperatur fast quantitativ. Die Geschwindigkeit der Reaktion ist nach Versuchen Bodensteins proportional dem Druck des Wasserstoffs und der Quadratwurzel aus dem Druck des S. Die Erscheinungen lassen sich erklären durch die Annahme, daß S_8 in $4S_2$ sehr langsam, S_2 in 2S sehr rasch und $H_2 + S$ in H_2S mit meßbarer Geschwindigkeit übergeht. Bei 310° dauert die vollständige Vereinigung etwa 168 Stunden; bei höheren Temperaturen verläuft die Reaktion $H_2 + S = H_2S$ nicht mehr quantitativ, sondern es stellt sich das Gleichgewicht ein: $2H_2 + S_2 \rightleftarrows 2H_2S$.

Von zahlreichen anderen Bildungsweisen sei erwähnt, daß H_2S sich bildet bei Auflösung von Fe, Zn, Al in HCl bei Gegenwart von S; ferner bei der Zersetzung von Schwefelbor und Schwefelphosphor durch Wasser, beim Erhitzen organischer Substanzen mit S. Auch die genügend energische Reduktion der Sauerstoffsäuren des S führt zu H_2S.

Physiologische Wirkungen: Bei Einatmung wirkt H_2S als ein starkes Gift; er reduziert das Oxyhämoglobin und fällt das Eisen desselben als Sulfid. Im Zentralnervensystem ruft H_2S bei Einatmung auch in verdünntem Zustand Lähmungserscheinungen hervor, welche schließlich zum Tode führen. Ein Gehalt von 0,060% wirkt auf Vögel, von 0,4% auf Säugetiere tödlich. Vergiftung durch Absorption in der äußeren Haut tritt nicht ein.

Physikalische Eigenschaften: H_2S ist unter gewöhnlichen Verhältnissen ein farbloses Gas (mit einem Absorptionsspektrum im Ultraviolett) von widerlichem, an faule Eier erinnerndem Geruch. Unter Druck läßt H_2S sich zu einer farblosen Flüssigkeit vom Fp. = −85°, Sdp. = −60° kondensieren. Spezifisches Gewicht des flüssigen H_2S beim Sdp. = 0,964; Brechungsexponent bei 20° für Na-Licht n = 1,374; Refraktionsvermögen für die D-Linie 0,429 (nach der Formel $\frac{n-1}{d}$) oder 0,262 (nach der Formel $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{d}$). Der Dampfdruck beträgt bei:

−84°	−78,4°	−73,3	−69,1	−62,3	
193	270	364	456	672	mm

Kritische Temperatur 100°, kritischer Druck 90 Atmosphären. Die molekulare Verdampfungswärme beträgt 4230 cal.

Die Dichte des gasförmigen H_2S entspricht der einfachen Formel H_2S. Ein Liter bei 0° und 760 mm wiegt 1,5392 g. Brechungsexponent für die D-Linie bei 18,5° n = 1,000639, Refraktionsvermögen nach der n-Formel 0,413, nach der n^2-Formel 0,275. Spezifische Wärme zwischen 20° und 206°: $C_p = 0{,}245$.

Für die Bildungswärme von H_2S-Gas aus H_2 und S_I ist nach einer Arbeit von Pollitzer als wahrscheinlichster Wert 4500 bis 5000 cal anzunehmen.

H_2S ist in H_2O leicht löslich; die Löslichkeit folgt dem Henryschen Gesetz, ist also dem H_2S-Partialdruck proportional. Ein Volumen H_2O absorbiert zwischen 0° und 43°: $4{,}3706 - 0{,}083687\,t + 0{,}0005213\,t^2$ Volumina H_2S. Die Absorptionswärme in Wasser beträgt nach Thomson 4760 cal pro Mol. — Durch Kochen läßt sich aus der wässerigen Lösung alles H_2S austreiben.

Chemisches Verhalten: Bei höherer Temperatur zerfällt, wie erwähnt, H_2S nach dem Schema:

$$2H_2S \rightleftarrows 2H_2 + S_2.$$

Das Gleichgewicht ist von Preuner untersucht worden. Die Konstante K des Massenwirkungsgesetzes, $K = \frac{[S_2].[H_2]^2}{[H_2S]}$ (die eckigen Klammern bedeuten die Konzentrationen der Stoffe) ist bei:

t°	K	K_p
750	$1{,}06 . 10^{-6}$	$0{,}89 . 10^{-4}$
830	4,2	3,8
945	24,5	24,5
1065	107,5	118
1132	220	260

Unter K_p ist die auf Partialdrucke bezogene Konstante angegeben.

Die Wärmetönung für $S_2 + 2H = 2H_2S$ folgt aus der Verschiebung des Gleichgewichts mit der Temperatur nach der Gleichung der Reaktionsisochore zu 40000 cal.

Mit Luft verbrennt H_2S leicht zu SO_2; bei mangelnder Sauerstoffzufuhr oder bei Abkühlung der Flamme geht die Oxydation nur bis zu S: $H_2S + 3O = H_2O + SO_2$; $H_2S + O = H_2O + S$. Oxydationsmittel wie Cl, Br, J scheiden aus H_2S Schwefel ab, ebenso wirken Metallsuperoxyde, Chlorate, Chromate, gasförmige HOCl. Rauchende HNO_3 wirkt unter Explosion auf H_2S ein. Metalle verdrängen den Wasserstoff und bilden Sulfide, einige, wie Na, K direkt, andere, wie Cu, Ag bei gewöhnlicher Temperatur nur unter Mitwirkung von Luftsauerstoff. Bei höheren Temperaturen treten Gleichgewichte zwischen H_2S und Metall auf.

In der wässerigen Lösung (Schwefelwasserstoffwasser) zeigt H_2S schwach saure Eigenschaften; mit fein verteiltem Fe, Zn entwickelt er Wasserstoff. H_2S gehört zu den sehr schwachen Säuren. Seine elektrolytische Dissoziation entspricht wesentlich der ersten Dissoziationsstufe $H_2S \rightleftarrows H^{\cdot} + SH'$. Die Dissoziationskonstante ist öfter bestimmt worden, am genauesten von Auerbach, welcher den Wert $k_1 = 0{,}97 . 10^{-7}$ bei 18° findet. H_2S reiht sich also nach seiner Stärke zwischen Kohlensäure ($3{,}04 . 10^{-7}$) und Borsäure ($1{,}7 . 10^{-9}$) ein. In bezug auf die zweite Dissoziationsstufe $HS' \rightleftarrows H^{\cdot} + S''$ ist H_2S noch sehr viel schwächer, die Konstante wird von Knox zu $1{,}2 . 10^{-15}$ angegeben. Nach den mitgeteilten Zahlen beträgt die Konzentration der $H^{\cdot}$- und HS'-Ionen in einer gesättigten, ca. 0,1 normalen H_2S-Lösung etwa $0{,}95 . 10^{-4}$, die der S''-Ionen sogar nur $1{,}2 . 10^{-15}$.

Die Aequivalentleitfähigkeit bei 18° ist nach Auerbach (η = Aequivalentkonzentration, λ = Aequivalentleitfähigkeit):

η	λ
1/22,56	0,538
1/35,9	0,688
1/69,9	0,954
1/113,9	1,224
1/233,9	1,743

Die relative Wanderungsgeschwindigkeit des HS'-Ions wird zu 62 angegeben.

Auch in wässeriger Lösung besitzt H_2S stark reduzierende Eigenschaften. Auf verschiedenen Wegen wurde das Potential der S-Elektrode gegen eine Normal-S''-Ionenlösung bestimmt; es liegt bei $-0{,}55$ (gegen die Wasserstoffnormalelektrode gemessen). Daraus folgt, daß eine H_2S-Lösung, welche normal in bezug auf S''- und $H^{\cdot}$-Ionen wäre, sich spontan unter Abscheidung von H_2 und S zersetzen müßte; daß H_2S-Wasser das nicht tut, hängt mit seiner außerordentlich geringen Konzentration an S''-Ionen zusammen, wodurch das S-Potential stark nach der positiven Seite verschoben wird. Immerhin wirkt O wegen seines viel höheren Potentials auf H_2S-Lösungen unter Schwefelabscheidung ein; die Geschwindigkeit der Reaktion wird durch Licht beeinflußt. Rotes Licht beschleunigt, während violettes verzögernd wirken soll. Bei gutem Luftabschluß läßt H_2S-Wasser sich längere Zeit aufbewahren; die Haltbarkeit wird durch Zusatz von etwa 2% Glycerin sehr vergrößert. Cl, Br, auch J fällen infolge ihrer größeren Elektroaffinität ebenfalls S aus H_2S-Lösungen praktisch vollständig aus; theoretisch würde ein Gleichgewichtszustand erreicht werden, wenn die Potentiale S gegen S''-Ion und Halogen gegen Halogenion gleich geworden sind.

Auch gegen viele andere Stoffe wirkt H_2S als Reduktionsmittel; $Fe^{\cdots}$, CrO_4'' und MnO_4'' werden zu $Fe^{\cdot\cdot}$, $Cr^{\cdots}$ und $Mn^{\cdot\cdot}$ reduziert. Konzentrierte H_2SO_4 oxydiert H_2S zu S, indem sie selbst zu SO_2 reduziert wird. SO_2 und H_2S fällen sich gegenseitig aus: $2H_2S + SO_2 = 3S + 2H_2O$. Als Zwischenprodukte der Reaktion entstehen dabei Polythionsäuren (s. diese). Bei energischer Oxydation des H_2S bildet sich schließlich H_2SO_4.

Die Schwefelwasserstoffsäure liefert als zweibasische Säure, den beiden substituierbaren H-Atomen entsprechend, zwei Reihen von Salzen, neutrale und saure. Die neutralen (Sulfide) entsprechen in ihrer Zusammensetzung den Oxyden, die sauren (Hydrosulfide) den Hydroxyden.

Von den Bildungsweisen der Sulfide wurde die direkte Vereinigung von Metall und S schon erwähnt. Aus Oxyden bilden sich Sulfide durch Ueberleiten von S-Dampf bei höherer Temperatur unter Verdrängung des O, welcher sich mit weiterem S zu SO_2 verbindet. Beim gelinden Erhitzen von Hydroxyden oder Karbonaten der Alkalien und Erdalkalien mit S erhält man Sulfide (oder Polysulfide) neben Thiosulfat, etwa nach der Gleichung:

$$6NaOH + 4S = 3H_2O + Na_2S_2O_3 + 2Na_2S.$$

Ueberschüssiger S addiert sich dabei an das gebildete Sulfid und liefert Polysulfid.

Eine weitere Bildungsweise, die besonders zur Darstellung der Sulfide von Al und Ti angewendet wird, ist die Reduktion der Metalloxyde durch Schwefelkohlenstoff bei höherer Temperatur; ferner erhält man Sulfide durch Reduktion der Sulfate bei höherer Temperatur; auf diesem Wege stellt man die Sulfide der Alkalien und Erdalkalien gewöhnlich her.

Wichtig ist die Bildung von Metall-

sulfiden durch doppelte Umsetzung in wässriger Lösung, z. B. nach der Gleichung:

$$FeCl_2 + H_2S = FeS + 2HCl.$$

In Zusammenhang mit der geringen Elektroaffinität des S''-Ions steht, daß die Mehrzahl der Sulfide in H_2O schwer löslich ist. Ob nach der obigen Gleichung beim Einleiten von H_2S in eine Metallsalzlösung das Sulfid ausgefällt wird, hängt von dem Löslichkeitsprodukte desselben ab. In der Lösung eines schwerlöslichen Sulfides, z. B. FeS, besteht das Gleichgewicht $Fe^{\cdot\cdot} + S'' \rightleftarrows FeS$. Nach dem Gesetz der Massenwirkung ist also in der gesättigten Lösung $[Fe^{\cdot\cdot}].[S''] = K$.

Die Konstante K heißt das Löslichkeitsprodukt; wird durch Zufügen von H_2S (also von, wenn auch wenig, S''-Ionen) zu einer $Fe^{\cdot\cdot}$-Ionenlösung das Produkt $[Fe^{\cdot\cdot}] . [S''] > K$, so muß sich so lange FeS im festen Zustande ausscheiden, bis der Wert K wieder erreicht ist; d. h. wenn das Löslichkeitsprodukt eines Sulfides genügend klein ist, so muß dasselbe praktisch quantitativ ausfallen. Bei einem bestimmten Metall hängt das Verhalten beim Einleiten von H_2S wesentlich ab von der Konzentration der zugesetzten S''-Ionen, welche durch Zufügen starker Säuren oder Alkalien in weiten Grenzen variiert werden kann. In Lösungen, welche eine starke Säure enthalten, wird nach dem Massenwirkungsgesetz die Dissoziation des H_2S, als einer sehr schwachen Säure, stark zurückgedrängt, die S''-Ionenkonzentration also außerordentlich klein. Aus sauren Lösungen können daher nur die am allerschwersten löslichen Sulfide, deren Löslichkeitsprodukt trotz der verschwindend kleinen S''-Ionenkonzentration noch überschritten wird, ausfallen. Andere Sulfide, die aus sauren Lösungen nicht ausfallen, tun dies aus neutralen oder alkalischen Lösungen, in denen größere S''-Ionenkonzentrationen möglich sind. Man überzeugt sich leicht, daß solche Sulfide umgekehrt bei Zusatz starker Säuren wieder in Lösung gehen müssen.

In die erste Gruppe (aus sauren Lösungen fällbar, nur in konzentrierten Säuren oder Königswasser löslich) gehören Au, Pt. As, Sb, Ag, Hg, Pb, Bi, Cu, Cd; in die zweite Gruppe (aus alkalischer Lösung fällbar) Zn, Ni, Co, Fe, Mn. Zn bildet einen Uebergang zwischen der ersten und zweiten Gruppe, insofern es aus sehr schwach sauren Lösungen noch ausfällt.

Die Sulfide von sehr schwach basischen Metallen wie Al und Cr werden durch H_2O vollständig hydrolysiert. Al und Cr fallen deshalb aus alkalischen Lösungen wohl aus, indessen nicht als Sulfide, sondern als Hydroxyde.

Leicht löslich, daher durch H_2S überhaupt nicht fällbar, sind die Sulfide der Alkalien einschließlich NH_4 und Erdalkalien.

Das charakteristische Verhalten der Metallionen gegen H_2S dient als wichtigstes systematisches Trennungsmittel in der qualitativen Analyse (vgl. den Artikel „Qualitative Analyse").

Gegen Oxydationsmittel verhalten sich die Sulfide wie H_2S; sowohl in Lösung wie in festem Zustande werden sie leicht zu Sulfat oder niedereren Oxydationsstufen des S oxydiert.

Die Sulfide der Alkalien sind in festem Zustand schwach gelblich und farblos in Wasser löslich; wegen der Schwäche der Schwefelwasserstoffsäure sind die Lösungen weitgehend hydrolysiert und reagieren alkalisch.

Thomson, der die Neutralisationswärme von H_2S durch starke Alkalien untersuchte, hielt H_2S sogar für eine einbasische Säure, weil er eine Neutralisationswärme von 7800 cal erhielt, gleichgültig, ob er ein oder zwei Aequivalente NaOH zufügte; der Streit, den er darüber mit Kolbe führte, welcher aus chemischen Gründen die Zweibasischkeit verfocht, erledigt sich nach den heutigen Kenntnissen dahin, daß in verdünnten Lösungen, wie sie Thomson untersuchte, allerdings wegen der Hydrolyse fast ausschließlich NaHS bezw. dessen Ionen Na' und HS' existieren; in konzentrierteren Lösungen sind dagegen zweifellos das neutrale Salz Na_2S und dessen Ionen 2Na' und S'' in erheblicher Menge vorhanden. Küster hat den Hydrolysengrad von Na_2S-Lösungen durch Messung der katalytischen Wirkung der abgespaltenen OH'-Ionen bestimmt und in einfach molarer Lösung zu 51,6%, in 0,05-molarer Lösung zu ca. 85% gefunden. Knox nimmt für die letztere Zahl den vermutlich zu hohen Wert 98% an. Die Hydrolyse der zweiten Stufe ist unbeträchtlich; NaHS ist in 0,1 normaler Lösung nur zu 0,15% hydrolysiert.

Die Sulfide der Erdalkalien sind ziemlich schwer löslich; sie gehen aber in Berührung mit Wasser unter Hydrolyse zu Hydrosulfiden langsam in Lösung. Die Sulfide von Al und Cr sind nur auf trockenem Wege darstellbar; durch Wasser werden sie vollständig zu Hydroxyd und H_2S zerlegt.

Die Sulfide der schweren Metalle, wie sie aus wässerigen Lösungen durch Fällung erhalten werden, sind amorph und oft charakteristisch gefärbt; sie enthalten eine unbestimmte Menge H_2O absorbiert und neigen in diesem Zustand zur Bildung kolloidaler Lösungen, besonders leicht die Sulfide von Ni, Cu, As. Durch Erhitzen unter Luftabschluß lassen sie sich in den kristallisierten Zustand überführen, in wel-

chem sie auf trockenem Wege direkt erhalten werden und in der Natur vorkommen. Sie sind dann spröde, zum Teil von metallischem Aussehen; im geschmolzenen Zustand leiten sie den Strom elektrolytisch; an der Anode scheidet sich S ab, der mit Kohlenanoden CS_2 bildet. Im festen Zustand scheint die relativ gute Leitfähigkeit vieler Sulfide mindestens zum Teil metallisch zu sein.

Die Analogie des zweiwertigen S zu O zeigt sich auffallend in der Existenz „basischer" und „saurer" Sulfide, welche sich unter Bildung von Salzen von Sulfosäuren vereinigen. Die Sulfide von As, Sb, Sn, Au (auch die nicht aus wässerigen Lösungen fällbaren CS_2 und P_2S_5 gehören hierher) lösen sich in Schwefelalkalien auf; z. B. As_2S_5 zu K_3AsS_4; der Vorgang entspricht vollkommen der Vereinigung von As_2O_5 mit K_2O nach:

$$As_2O_5 + 3K_2O = 2K_3AsO_4.$$

Die Löslichkeit in Schwefelalkalien bietet ein Mittel, die Sulfide von As, Sb, Sn, Au, die „Sulfosäuren", von den Sulfiden von Hg, Ag, Cu, Pb, Cd, den „Sulfobasen", zu trennen (in geringem Maß sind übrigens auch die Sulfide von Cu, Hg, Ag in Na_2S unter Komplexbildung löslich). Die freien Sulfosäuren sind nicht existenzfähig, sondern zerfallen, wenn sie durch Ansäuern der Lösung der Sulfosalze in Freiheit gesetzt werden, sofort in Sulfid und H_2S.

Analyse: Qualitativer Nachweis:

1. Durch den Geruch nach faulen Eiern.

2. Durch die Heparreaktion.

3. Ein mit Bleiacetat getränktes Filtrierpapier wird durch H_2S-Gas geschwärzt (Bildung von PbS).

4. Mit Nitroprussidnatrium $[Fe(CN)_5NO]Na_2 + 2H_2O)$ erzeugt H_2S in alkalischer Lösung eine intensiv violette Färbung (Reaktion auf S''-Ionen, tritt daher in saurer Lösung nicht ein).

5. Die empfindlichste Reaktion ist folgende:

Man versetzt die zu prüfende Flüssigkeit mit etwas HCl und einigen Körnchen Paraamidodimethylanilinsulfat und gibt 1 bis 2 Tropfen verdünnte $FeCl_3$-Lösung hinzu; bei Anwesenheit von H_2S tritt Blaufärbung auf infolge von Methylenblaubildung (Caro und Fischer). Die Empfindlichkeit dieser Reaktion erlaubt noch 0,0182 mg H_2S in 1 Liter H_2O nachzuweisen.

Quantitative Bestimmung: H_2S wird nach Oxydation zu H_2SO_4 als $BaSO_4$ gefällt und gewogen. Maßanalytisch wird H_2S bestimmt mit Jodlösung: $H_2S + J_2 = 2HJ + S$.

Man gibt einen gemessenen Ueberschuß an Jodlösung zu und titriert mit Natriumthiosulfat zurück.

Die außerordentlich geringe Löslichkeit der Schwermetallsulfide und ihre Reihenfolge geht aus folgenden, einer Tabelle von Bruner und Zawadski entnommenen Zahlen hervor:

	Löslichkeitsprodukt
FeS	$3{,}7 . 10^{-19}$
ZnS	$1 . 10^{-21}$ bis $5 . 10^{-26}$
CdS	$5 . 10^{-29}$
PbS	$3{,}4 . 10^{-28}$
CuS	$1{,}2$ bis $5{,}9 . 10^{-42}$
Ag_2S	$1{,}5$ bis $3{,}9 . 10^{-50}$
HgS	$1{,}0 . 10^{- 3}$

Polysulfide und Wasserstoffpersulfid. Die Polysulfide bilden sich durch Addition von S an Sulfide beim Schmelzen von Sulfiden mit S oder beim Kochen wässeriger Sulfidlösungen mit S. Besonders gut bekannt sind in festem Zustand wie in Lösung die Polysulfide der Alkalien und Erdalkalien. In festem Zustand besitzen sie die Formeln M_2S_n, wo M ein Metalläquivalent, n eine ganze Zahl von 2 bis 5 bedeutet. In der wässerigen, gelb bis braun gefärbten Lösung scheinen komplizierte Gleichgewichtszustände zu bestehen. An S gesättigte Lösungen von Na_2S enthalten nach Küster im Maximum 5,24 Atome S auf 2 Atome Na, so daß man außer S_2'', S_3'', S_4'', S_5'' mindestens noch die Existenz von S_6'' annehmen muß. Auch in Lösungen von der Zusammensetzung Na_2S_5 wird man keineswegs allen S als S_5''-Ion in der Lösung anzunehmen haben, sondern ein Gleichgewicht zwischen allen möglichen Polysulfidionen. Besonders beständig ist nach Untersuchungen von Küster das Tetrasulfid, welches auch aus wässerigen Polysulfidlösungen leicht kristallisiert erhalten wird. Nur in geringer Menge sind vermutlich Bi- und Trisulfid vorhanden; außer anderen Gründen spricht dafür die Tatsache, daß sie aus wässerigen Lösungen nicht auskristallisieren (wohl dagegen aus alkoholischen).

Durch Schwermetalle wird den Polysulfidlösungen der über das Verhältnis Na_2S hinausgehende S leicht wieder entzogen unter Bildung von Metallsulfid. Die Polysulfide sind aufzufassen als Salze von komplexen Schwefel-Schwefelwasserstoffsäuren, analog etwa den komplexen Jod-Jodwasserstoffsäuren ($HJ . J_2$ usw.). Ueber die Konstitution der komplexen Anionen läßt sich nichts Sicheres angeben.

Freies Wasserstoffpersulfid wird erhalten beim Eingießen von Na_2S_5-Lösung in einen großen Ueberschuß von HCl als eine gelbe ölige Masse; daneben entsteht auch H_2S und S; beim umgekehrten Arbeiten erhält man nur letztere. Die Analysen der erhaltenen Produkte ergeben Werte von H_2S_5 bis H_4S_5; es ist bisher noch nicht möglich gewesen, aus dem Gemisch einzelne chemische

Individuen zu isolieren; Rebs will nach verschiedenen Methoden immer ein der Formel H_2S_5 entsprechendes Produkt erhalten haben.

Verbindungen des Schwefels mit den Halogenen. Die Stabilität der Halogenverbindungen des S nimmt nach der Reihenfolge F, Cl, Br, J ab: Während SF_6 sich durch seine große Inaktivität gegen chemische Agenzien auszeichnet, sind von J bisher überhaupt keine Verbindungen mit Sicherheit bekannt.

Schwefelhexafluorid, SF_6. Schwefelhexafluorid wurde von Moissan durch Vereinigung von Fluorgas mit S als ein farbloses Gas dargestellt, welches durch Kondensation gereinigt werden kann. Es erstarrt bei —55° zu weißen Kristallen. Chemisch ist SF_6 merkwürdig durch die für einen Körper dieser Zusammensetzung ganz unerwartete Trägheit, die geradezu an N erinnert. Trotz der großen Affinität des F zu H reagiert es nicht mit H, selbst beim Erhitzen nicht; Na-Metall kann in einer SF_6-Atmosphäre geschmolzen werden, ohne seine blanke Oberfläche zu verlieren; schmelzendes NaOH wirkt nur sehr langsam ein. Durch den elektrischen Funken wird SF_6 partiell zerlegt. — Weitere Verbindungen von S und F sind nicht bekannt.

Schwefelchlorür, S_2Cl_2. Schwefelchlorür bildet sich durch Vereinigung der Elemente beim Leiten von Cl über S. Die Verbindung stellt ein dunkelgelbes Oel dar von der Dichte d = 1,69. Technisch erhält man S_2Cl_2 als Nebenprodukt bei der Fabrikation von Tetrachlorkohlenstoff: $CS_2 + 6Cl = CCl_4 + S_2Cl_2$. S_2Cl_2 findet technische Verwendung zur Vulkanisation des Kautschuks. Sdp. = 138°. Es destilliert unzersetzt. Fp. = —80°. Bildungswärme nach Thomson: $2S_{fest} + Cl_{2\,gas} = S_2Cl_{2\,fl.} + 14250$ cal.

Das Molekulargewicht in flüssigem Cl und Br entspricht der Formel S_2Cl_2; im Dampfzustand ist S_2Cl_2 teilweise dissoziiert. S wird von S_2Cl_2 leicht gelöst, vielleicht unter Bildung noch chlorärmerer Verbindungen; in der gesättigten Lösung kommen etwa 2 Atome gesamter S auf 1 Atom Cl.

Der Dampf von S_2Cl_2 verbrennt mit O durch ein glühendes Rohr geleitet zu SO_2Cl_2 (Sulfurylchlorid) und SO_3. In H_2O sinkt S_2Cl_2 als schweres Oel zu Boden und wird langsam zersetzt, es bilden sich HCl, S und SO_2. Durch P wird dem S_2Cl_2 das Cl entzogen; beim Destillieren geht PCl_3 über, während S zurückbleibt. — Metalle reagieren wegen ihrer großen Affinität zu Cl ebenfalls unter Abscheidung von S und bilden Metallchlorid. Na und Mg wirken merkwürdigerweise auch beim Siedepunkt des S_2Cl_2 nur langsam auf dasselbe ein; langsam reagieren auch Fe, Zn, Co, Ni. Al reagiert beim Erwärmen lebhaft, ebenso As, Sb, Sn. An ungesättigte organische Verbindungen addiert sich S_2Cl_2. Mit sauerstoffhaltigen organischen Verbindungen reagiert es unter Bildung organischer Chlorverbindungen unter gleichzeitiger Entstehung von SO_2 und HCl.

Schwefeldichlorid, SCl_2. Schwefeldichlorid bildet sich langsam, wenn Cl im berechneten Verhältnis mit S_2Cl_2 gemischt wird. Die Farbe der Mischung, welche anfangs gelb ist, wird im Verlauf einiger Tage dunkelbraun. Die chemische Individualität des SCl_2 ist öfter bestritten worden, weil die Gefrierpunktskurve von S_2Cl_2-Cl_2-Gemischen nicht auf die Existenz desselben hinweist; die Molekulargewichtsbestimmung in Benzol ergibt zwar das Molekulargewicht des SCl_2, das Resultat ist indessen nicht beweisend, weil eine Mischung von S_2Cl_2 und Cl_2 das gleiche scheinbare Molekulargewicht zeigen würde; denn die eventuelle Bildung von $2SCl_2$ aus S_2Cl_2 und Cl_2 verändert die Zahl der Moleküle nicht. Für die Existenz von SCl_2 spricht 1. die erwähnte Farbänderung beim Mischen von S_2Cl_2 und Cl_2; 2. läßt sich unter vermindertem Druck eine konstant siedende Fraktion, deren Zusammensetzung SCl_2 unabhängig vom Druck ist, abdestillieren; 3. ergeben Molekulargewichtsbestimmungen nach der Siedemethode in S_2Cl_2 als Lösungsmittel, welche dem obigen Einwand nicht unterliegen, das richtige Molekulargewicht.

Die Lösungen von Cl_2 in S_2Cl_2 zeigen einen erheblichen Cl-Dissoziationsdruck; beim fortgesetzten Erwärmen verdampft schließlich alles Cl bis die Zusammensetzung S_2Cl_2 erreicht ist.

Schwefeltetrachlorid, SCl_4. Schwefeltetrachlorid bildet sich beim Sättigen von S_2Cl_2 mit Cl_2 bei Temperaturen unter —20°, oder besser durch Vereinigung der berechneten Mengen S und Cl im geschlossenen Rohr. SCl_4 ist eine leichtbewegliche, gelbbraune Flüssigkeit.

Fp. — 31°. Der Cl-Dissoziationsdruck erreicht schon wenig über dem Fp. eine Atmosphäre. Durch H_2O wird SCl_4 in SO_2 und HCl zerlegt. SO_3 bildet Thionylchlorid nach der Gleichung:

$$SCl_4 + SO_3 = SOCl_2 + SO_2 + Cl_2.$$

Mit einer Anzahl von Chloriden bildet SCl_4 Doppelverbindungen, so mit JCl_3, $SbCl_3$, $TiCl_4$, $SnCl_4$, $AlCl_3$, $ZnCl_2$, $FeCl_3$, $AuCl_3$.

Schwefelbromür, S_2Br_2. Bildung analog wie bei S_2Cl_2. Rote Flüssigkeit, d = 2,64; läßt sich bei vermindertem Druck unzersetzt destillieren. Fp. = — 46°. Der Br-Dissoziationsdruck ist beträchtlich; beim Durchleiten von Luft bleibt schließlich S zurück. In der Wärme löst S_2Br_2 reichlich S, der beim Erkalten wieder auskristallisiert.

Die Bildungswärme von S_2Br_2 ist sehr klein. Nach Thomson ist:

$$2S_{fest} + Br_{2\,fl.} = S_2Br_{2\,fl.} + 1000 \text{ cal.}$$

Höhere bromhaltige Verbindungen von den Formeln SBr_2 und SBr_4 finden sich in der Literatur beschrieben; ihre Existenz ist jedoch ganz unbewiesen; wahrscheinlich handelt es sich nur um Lösungen von Br in S_2Br_2.

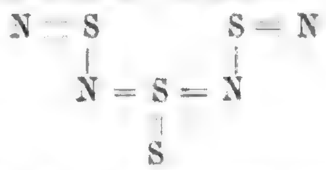
Verbindungen von Jod und S finden sich gleichfalls häufig beschrieben. Nach neueren Arbeiten sind solche überhaupt bisher nicht bekannt. Damit stimmt überein, daß Thomson beim Lösen von J in S keine Wärmetönung beobachtete.

Verbindungen des Schwefels mit Stickstoff. Die als normales Nitrid des S zu erwartende Verbindung ist unbekannt; der am besten untersuchte Schwefelstickstoff ist der feste Schwefelstickstoff.

Fester Schwefelstickstoff, N_4S_4, entsteht bei Einwirkung von NH_3 auf $SOCl_2$ sowie auf S_2Cl_2 und SCl_2, wobei man CS_2 oder Benzol als Verdünnungsmittel anwendet. Eine zweite Bildungsweise ist die Einwirkung von S auf flüssiges NH_3; S wird von NH_3 mit roter Farbe gelöst (Moissans „Sulfammonium"), wobei die umkehrbare Reaktion stattfindet:

$$10S + 4NH_3 \rightleftarrows 6H_2S + N_4S_4.$$

Rötlichgelbe Kristalle des rhombischen oder monoklinen Systems. d = 2,2. Fp. = 178°; sublimiert bei 135°. Molekulargewicht: S_4N_4. Konstitution vielleicht:



S_4N_4 ist endotherm, explodiert durch Reiben oder Stoß, auch beim Erwärmen auf 207°. Durch Wasser, Säuren und Alkalien wird die Verbindung zerlegt; es entsteht NH_3 sowie verschiedene Sauerstoffsäuren des S.

HCl zersetzt nach: $N_4S_4 + 12HCl = 4NH_3 + 4S + 12Cl$. Mit SCl_2 bildet S_4N_4 die Additionsverbindungen: $N_4S_4.SCl_2$, $N_4S_4.2SCl_2$ und $3N_4S_4.2SCl_2$; mit Cl und Br entstehen daraus $N_4S_4Cl_4$, $N_4S_4Br_4$ und $N_4S_4Br_6$. Von Muthmann wurden Verbindungen NSO_4 und NSO beschrieben, die aus N_4S_4 bezw. $N_4S_4Br_4$ mit NO_2 erhalten wurden.

Flüssiger Schwefelstickstoff, N_2S_5. Flüssiger Schwefelstickstoff entsteht bei Einwirkung von CS_2 auf N_4S_4 unter Druck; leicht bewegliche, rote, zersetzliche Flüssigkeit. d = 1,90. Kp. 10° bis 11°. Unlöslich in H_2O, löslich in organischen Flüssigkeiten. H_2O, Säuren, Alkalien zersetzen N_2S_5 unter Bildung von NH_3 und S.

Verbindungen von Schwefel mit Phosphor. Mit P verbindet sich S in mehreren Verhältnissen. Bekannt sind P_4S_3, P_4S_7, P_3S_6 und P_2S_5, welche sämtlich durch Zusammenschmelzen von rotem P und S im richtigen Verhältnis dargestellt werden. In weißem P löst sich S zunächst auf unter starker Depression des Gefrierpunktes; beim Erwärmen erfolgt die Vereinigung unter Explosion.

Tetraphosphortrisulfid, P_4S_3. In reinem Zustand hellgelb, fast farblos, kristallisiert in rhombischen Prismen. Fp. 165° bis 166°. Siedet unter 10 mm Druck bei 225 bis 235°. Löslich in CS_2, PCl_3 und Phosphorsulfochlorid. Molekulargewicht im Dampfzustand und in CS_2 normal. Wird durch Alkohol und Aether zersetzt, durch H_2O erst bei höheren Temperaturen. An der Luft entzündet es sich bei etwa 100°; oxydiert sich bei 40 bis 60° unter Leuchten, wie P. Die Phosphoreszenz unterliegt den gleichen Gesetzen wie bei P, nur erfolgt sie bei etwas höherer Temperatur.

Tetraphosphorheptasulfid, P_4S_7. Entsteht beim Zusammenerhitzen von P und S im Verhältnis 2:3 neben P_4S_3.

Triphosphorhexasulfid, P_3S_6. Hellgelbe durchsichtige Kristalle, oft von 2 bis 3 cm Länge. Fp. 296 bis 298°. Sdp. bei 10 mm Druck 335 bis 338°. Molekulargewicht im Dampfzustand normal.

Phosphorpentasulfid, P_2S_5. Bildung durch Zusammenschmelzen von S und P, ferner durch Erhitzen der CS_2-Lösung von P und S auf 210° im geschlossenen Rohr unter Zusatz von J als Katalysator.

Sdp. 530°. Fp. 274 bis 276°. Molekulargewicht im Dampfzustand P_2S_5, in CS_2-Lösung P_4S_{10}. Außer der gewöhnlichen gelben Modifikation ist noch eine zweite in CS_2 viel löslichere bekannt. Die Isomerie beider Formen ist chemisch.

P_2S_5 verbrennt an der Luft mit fahler Flamme. Mit H_2O zersetzt es sich in H_3PO_4 und H_2S. Mit NH_3 liefert P_2S_5 die Molekularverbindungen $P_2S_5.6NH_3$ und $P_2S_5.7NH_3$.

In der Phosphorsäure und der phosphorigen Säure kann der O ganz oder teilweise durch S ersetzt werden, wodurch Thiophosphate und Thiophosphite entstehen (abzuleiten von den Anhydriden P_2S_5 und dem unbekannten P_2S_3); die freien Säuren sind nicht existenzfähig, wohl aber die Salze. Bekannt sind ferner die Phosphoroxysulfide $P_4O_6S_4$, $P_2O_2S_3$ und die Phosphorsulfohalogenide $PSCl_3$, $PSBr_3$, PSF_3. Sulfojodide kennt man mehrere: $P_4S_3J_2$, PS_2J_2 und P_2SJ_4.

Verbindungen von Schwefel und Kohlenstoff.

Schwefelkohlenstoff, CS_2. Entdeckt 1796 durch Lampadius. Die Hauptbildungsweise des Körpers ist die aus S-Dampf beim Leiten über glühende Kohlen $C + 2S = CS_2$. Dies ist auch die technische Darstellungsweise. Das Rohprodukt enthält H_2S und organische S-Verbindungen; seine Reini-

gung geschieht durch Behandeln mit Kalkmilch, mit Brom und Pottasche; zuletzt wird über frischem Pflanzenfett destilliert. Auch durch rauchende HNO_3 wird CS_2 gereinigt.

CS_2 findet Anwendung zum Vulkanisieren des Kautschuks, als Lösungsmittel für Fette und Harze, zur Darstellung verschiedener schwefelhaltiger Verbindungen, sowie zur Bekämpfung der Reblaus. In reinem Zustand riecht CS_2 aromatisch und stellt eine farblose Flüssigkeit von hohem Brechungsexponenten dar. Brechungsexponent bei 0°: $n_D = 1,64362$; $n_{301,4} = 1,71989$; die Zunahme pro Grad beträgt bei 10° 0,000801. Bei 217 $\mu\mu$ zeigt CS_2 einen Streifen metallischer Reflexion. Ein zweiter Streifen liegt im Ultrarot.

$$d_4^t = 1,29366 - 0,00151\ t.$$

Fp. — 110 bis 112,8°, Sdp. 46,25°. Dampfspannung nach Regnault:

t	mm	t	mm
— 20	47,3	40	617,5
0	127,9	60	1164,5
+ 20	298,0	80	2032,5

Kritische Temperatur 272° bis 279°, kritischer Druck 73 bis 78 Atmosphären. Verdampfungswärme pro g:

$$89,5 - 0,16993\ t - 0,001016\ t^2\ \text{cal}$$

(Winkelmann). Spezifische Wärme des flüssigen CS_2 nach Regnault: $c = 0,2352 + 0,000162\ t$. Spezifische Wärme des Dampfes zwischen 86 und 190° $c_p = 0,1596$; $c_p/c_v = 1,234$ bei 99,7°.

Dielektrizitätskonstante für $\lambda = 73$ cm DK = 2,64. Der spezifische Widerstand beträgt $1,2 \cdot 10^{12}\ \Omega$. Im magnetischen Feld zeigt CS_2 starke Drehung der Polarisationsebene.

Die Bildungswärme von CS_2-Dampf aus amorpher Kohle und S_I ist nach Thomson —25430 cal, nach Berthelot —22100 cal; die Verbrennungswärme des Dampfes gibt letzterer zu 25300 cal an.

Die Bildung aus gasförmigem S_2 bei Temperaturen von 800 bis 1100° ist dagegen nach Koref von einer Wärmeentwickelung von 12500 cal begleitet, berechnet aus der Verschiebung des heterogenen Gleichgewichts zwischen S_2-Dampf, Kohle und CS_2 mit der Temperatur; das Gleichgewicht verschiebt sich mit wachsender Temperatur zuungunsten der CS_2-Bildung. Bei 900° ist $K = \frac{[S_2]}{[CS_2]} = 2,2$; bei 1800° berechnet sich $K = 73,6$.

CS_2 ist ein ausgezeichnetes Lösungsmittel für Fette und Harze, ebenso für viele andere organische Stoffe, für S, Br, J und P.

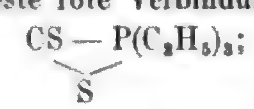
Sein chemisches Verhalten ist in einer Reihe von Reaktionen bestimmt durch die Abspaltung von S bei hoher Temperatur. Schwermetalle geben mit CS_2 in der Hitze Sulfide unter Abscheidung graphitartiger Kohle. Durch den Lichtbogen und durch stille elektrische Entladung wird CS_2 zersetzt.

Charakteristisch ist die leichte Ersetzbarkeit des S durch O, die sich in der sehr niedrigen Entzündungstemperatur (232°) zeigt. CS_2 verbrennt mit hellblauer Flamme zu CO_2 und SO_2. Die auftretende Strahlung ist keine Temperaturstrahlung, sondern als Chemolumineszenz aufzufassen, da die Flammentemperatur niedrig ist, nach Pringsheim weniger als 150° betragen kann, so daß Papier nicht gebräunt wird. Mit O und Luft bildet CS_2 explosive Mischungen. Unter dem Einfluß des Lichtes verbindet sich CS_2 langsam mit O zu CO_2, CO und einem polymeren Kohlenoxysulfid. Auch gegen andere Oxydationsmittel ist CS_2 sehr empfindlich. NO_2, rauchende HNO_3, $KMnO_4$, Brom und Wasser, oxydieren zu S oder H_2SO_4. Auch Metalloxyde oxydieren zu CO und gehen dabei selbst in Sulfide über. SO_3 liefert SO_2 und Kohlenoxysulfid nach der Gleichung: $CS_2 + SO_3 = COS + SO_2$. Durch H_2O und Alkalien wird CS_2 erst bei erhöhter Temperatur angegriffen:

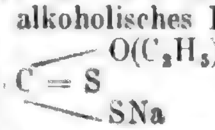
$$CS_2 + 2H_2O = CO_2 + 2H_2S.$$

Durch Reduktion leiten sich eine Reihe von organischen S-Verbindungen ab, die hier nicht besprochen werden können. Von anderen Derivaten des CS_2 sei hier noch erwähnt die Trithiokohlensäure H_2CS_3, das Analogon zur H_2CO_3, im Gegensatz zu ihr aber auch im freien Zustand bekannt; eine ölige Flüssigkeit, welche langsam zu CS_2 und H_2S zerfällt. Die Thiokarbonate werden als Mittel gegen die Reblaus angewandt; ihre Wirkung beruht auf der langsamen Zersetzung durch die CO_2 der Luft.

Analyse. Qualitativ: CS_2 wird nachgewiesen durch Triäthylphosphin; es entsteht eine feste rote Verbindung:



oder man führt CS_2 durch Einleiten in alkoholisches Kali im Na-Xanthogenat über



, welches mit $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionenlösungen eine schwarzbraune Fällung von $Cu^{\cdot\cdot}$-Xanthogenat liefert, welche schnell in gelbes $Cu^{\cdot}$-Xanthogenat übergeht.

Quantitativ: Nach Oxydation als $BaSO_4$. Maßanalytisch durch Ueberführung in Xanthogenat und Titration mit $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösung.

Kohlenoxysulfid, COS. Kohlenoxysulfid entsteht bei der Zersetzung der Rhodanwasserstoffsäure durch H_2O:

$$CSNH + H_2O = NH_3 + COS.$$

Diese Reaktion dient gewöhnlich zur

Darstellung; COS bildet sich durch Vereinigung von CO und S in der Hitze; die Reaktion führt zu einem Gleichgewicht. Da CO_2 in der Hitze partiell in CO und O dissoziiert, bildet sich COS auch aus CO_2 und S. Auch aus CS_2 und SO_3 entsteht COS:

$$CS_2 + 3SO_3 = COS + 4SO_2.$$

COS ist ein farb- und geruchloses Gas; seine physikalischen Konstanten liegen zwischen denen des CO_2 und des CS_2. Sdp. —47,5. Kritische Temperatur 105°, kritischer Druck 61 Atmosphären. Die Bildungswärme ist nur unsicher bekannt; während Thomson für $C_{amorph} + S_I = COS_{Dampf}$ eine Wärmetönung von 37 320 cal findet, gibt Berthelot für den gleichen Vorgang 19600 cal an.

COS verbrennt an der Luft zu CO_2 und SO_2 mit blauer Flamme; Gemenge mit Luft oder O sind explosiv. Durch H_2O wird COS hydrolysiert. $COS + H_2O = CO_2 + H_2S$. Als Zwischenprodukt entsteht dabei Thiokohlensäure: $C\begin{cases}SH\\ =O\\ OH\end{cases}$. Alkalische Lösungen absorbieren COS unter Bildung von unbeständigen Thiokarbonaten.

Cl_2 reagiert nach: $COS + 2Cl_2 = COCl_2 + SCl_2$.

Kohlenstoffsubsulfid, C_3S_2. Kohlenstoffsubsulfid ist schon länger bekannt, vor kurzem wurde es von Stock näher untersucht. Bildung: Aus CS_2 bei Gegenwart von Metallen, welche CS_2 unter Sulfidbildung reduzieren, entsteht als Nebenprodukt C_3S_2 schon bei Temperaturen unter 800°. Darstellung: Durch Verstäuben von Metallen in flüssigem CS_2 im Lichtbogen. Feste, gelbrote Substanz, welche bei —0,5° zu einer roten, stark lichtbrechenden Flüssigkeit schmilzt. Dampfdichte und Verhalten der Lösungen in CS_2 ergeben das Molekulargewicht C_3S_2. $d_4^{10} = 1{,}319$. In 0,1% CS_2-Lösung zeigt es breite Absorptionsstreifen im Grün und Blau; Absorptionsmaxima bei 530 $\mu\mu$ und 455 $\mu\mu$.

Die Konstitution ist analog dem Kohlenstoffsuboxyd, also S:C:C:C:S (Anhydrid der Thiomalonsäure).

Ueber organische S-Verbindungen vgl. die Artikel „Sulfokörper" und „Thiokörper".

Verbindungen von Schwefel mit Bor. Mit Bor bildet S die normale Verbindung B_2S_3, Borsulfid. Sie entsteht beim Erhitzen von B in S, von B und PbS, aus Borjodid und S bei 440°, aus Borsäure mit Kohle und CS_2. Weiße glasartige Masse oder feine Nadeln von der Dichte d = 1,55. Fp. 310°. Bildungswärme aus den festen Elementen nach Sabatier: 82000 cal.

Aus Borjodid und S in CS_2-Lösung soll nach Moissan ein Pentasulfid, B_2S_5, entstehen von der Dichte d = 1,85 und dem Fp. 390. Seine Existenz ist noch nicht sicher bewiesen, weil der Stoff nie frei von Jod erhalten wurde.

Vom Borsulfid, B_2S_3, leitet sich die Sulfometaborsäure ab, $H_2B_2S_4$. Auch verschiedene Sulfoxyborsäuren komplexer Konstitution sind bekannt, z. B. $H_3BO_3.3SO_3$.

Ueber die Sulfide des As, Sb, Sn und der Metalle siehe bei den betreffenden Elementen.

Verbindungen des Schwefels mit Sauerstoff und die Sauerstoffsäuren des Schwefels. S verbindet sich mit O in mehreren Verhältnissen; man kennt vier Oxyde, von denen drei sich als Anhydride von Säuren auffassen lassen (S_2O_3 kann trotz der formalen Zulässigkeit nicht als Anhydrid von $H_2S_2O_4$ gelten). Von besonderer Wichtigkeit sind SO_2, das Anhydrid der schwefligen Säure H_2SO_3, und SO_3, das Anhydrid der Schwefelsäure H_2SO_4.

Von Sauerstoffsäuren sind eine große Zahl bekannt; freilich ist nur H_2SO_4 im reinen Zustand bekannt, die anderen nur in wässeriger Lösung bezw. den Salzen.

Folgende Tabelle gibt eine Uebersicht:

		(H_2SO_2	Sulfoxylsäure)
		$H_2S_2O_4$	Hydroschweflige Säure
S_2O_3	Schwefelsesquioxyd	—	
SO_2	Schwefeldioxyd	H_2SO_3	Schweflige Säure
		$H_2S_2O_5$	Pyroschweflige Säure
SO_3	Schwefeltrioxyd	H_2SO_4	Schwefelsäure
		$H_2S_2O_7$	Pyroschwefelsäure
S_2O_7	Schwefelheptoxyd	$H_2S_2O_8$	Perschwefelsäure
		H_2SO_5	Carosche Säure
		$H_2S_2O_3$	Thioschwefelsäure
		$H_2S_2O_6$	Polythionsäuren.
		$H_2S_3O_6$	
		$H_2S_4O_6$	
		$H_2S_5O_6$	
		$H_2S_6O_6$	

Sämtliche Säuren des S mit Ausnahme der Caroschen Säure haben 2 als Ionen abspaltbare H-Atome und sind also zweibasisch. Hinsichtlich ihrer Dissoziation in wässeriger Lösung sind sie alle als mittelstarke bis starke Säuren zu bezeichnen. Man kann als Regel aussprechen, daß durch Sauerstoffaufnahme die Elektroaffinität des

S-haltigen Anions steigt: H_2S ist eine sehr schwache Säure, H_2SO_3 eine mittelstarke, H_2SO_4 eine sehr starke, wenn sie auch hinter HCl und NHO_3 noch etwas zurücksteht; ebenso ist $H_2S_2O_4$ schwächer als $H_2S_2O_6$; doch gilt die Regel nicht durchgehend. — Die Wanderungsgeschwindigkeiten der Anionen variieren von 65 (S_5O_6'') bis 93 (S_2O_6''). Die Reihenfolge entspricht keineswegs, wie man vermuten würde, der Masse der Ionen, sondern ist konstitutiven Einflüssen unterworfen.

Man kann die Sauerstoffsäuren des S in formaler Beziehung als eine Reihe verschiedener Oxydationsstufen des S auffassen; das Maß für den Oxydationsgrad bildet das nach Abzug von H_2O übrigbleibende Verhältnis von S zu O; die Pyrosäuren, welche sich aus den normalen Säuren durch Austritt von H_2O aus 2 Molekülen ableiten, sind in dieser Beziehung mit den normalen identisch und können daher in der folgenden Tabelle, welche die Reihenfolge der Säuren in bezug auf ihre Oxydationsstufe gibt, wegbleiben. Der S-Gehalt des formalen Anhydrids ist überall gleich 60 gesetzt.

$H_2S_6O_6$	$S_{60}O_{50}$
$H_2S_5O_6$	$S_{60}O_{60}$
$H_2S_2O_3$	
$H_2S_4O_6$	$S_{60}O_{75}$
$H_2S_2O_4$	$S_{60}O_{90}$
$H_2S_3O_6$	$S_{60}O_{100}$
H_2SO_3	$S_{60}O_{120}$
$H_2S_2O_6$	$S_{60}O_{150}$
H_2SO_4	$S_{60}O_{180}$
$H_2S_2O_8$	$S_{60}O_{210}$
H_2SO_5	$S_{60}O_{240}$

Diese Reihe kann aber nicht so aufgefaßt werden, als ob sie uns etwas über die Tendenz der Säuren, durch Oxydation ineinander überzugehen, aussagen könnte. Dafür sind viel verwickeltere Verhältnisse maßgebend. — Wenn man die Anionen der Säuren ins Auge faßt, sieht man leicht, daß es mehrere Paare gibt, deren eines Glied sich aus dem anderen durch Polymerisation ableiten läßt; solche Paare sind: $SO_3'' \rightarrow S_2O_6''$; $SO_4'' \rightarrow S_2O_8''$; $S_2O_3'' \rightarrow S_4O_6''$. Diese Uebergänge entsprechen möglichen Anodenvorgängen bei der Elektrolyse der Säuren. Der wirkliche Elektrodenvorgang verläuft nicht dem obigen Schema gemäß, sondern es handelt sich um eine Oxydation unter Mitwirkung von abgeschiedenem O nach dem Schema:

$$2S_xO_y'' + O + H_2O = S_{2x}O_{2y}'' + 2OH'.$$

Für die Frage nach den Affinitätsverhältnissen der Umwandlungen, d. h. den Potentialen der umkehrbaren S_xO_y''-$S_{2x}O_{2y}''$-Elektroden sind beide Formulierungen, wie eine leichte Ueberlegung lehrt, gleich zulässig.

In vielen Fällen sind wir übrigens über die elektromotorischen Kräfte von Uebergängen der Anionen von Säuren des S ineinander schlecht unterrichtet. Die Messungen scheitern oft an der Unmöglichkeit, die Vorgänge an der Elektrode reversibel zu leiten. Z. B. wird SO_3''-Ion leicht zu SO_4''-Ion oxydiert, während der umgekehrte Vorgang so schwer eintritt, daß das Potential einer Sulfit-Sulfatelektrode unabhängig von der Sulfatkonzentration gefunden wird, entgegen den Folgerungen, die für umkehrbare Elektroden aus dem Massenwirkungsgesetz zu ziehen sind; SO_4'' ist „elektromotorisch unwirksam".

Schwefelsesquioxyd, S_2O_3. Schwefelsesquioxyd wurde von Buchholz entdeckt, welcher die Verbindung 1804 als blaues Destillat beim Erhitzen eines Gemisches von S und konzentrierter H_2SO_4 erhielt. Berzelius war der Ansicht, daß die gefärbten Flüssigkeiten Lösungen von S in SO_3 seien. R. Weber stellte S_2O_3 als neues Oxyd des S fest.

Bildung: Beim Eintragen von Schwefelblumen in überschüssiges SO_3 bilden sich blaugrüne Tröpfchen von S_2O_3, welche zu Krusten von malachitähnlichem Aussehen erstarren. Man gießt den Ueberschuß von SO_3 ab und verdampft den Rest bei 37°; dabei bleibt das reine S_2O_3 zurück. Grüne, leicht zerreibliche Kristalle; sehr zersetzlich. Bei Temperaturen unter 15° einige Zeit haltbar; zersetzt sich bei gewöhnlicher Temperatur langsam, rascher beim Erwärmen, in SO_2 und S. Zieht stark Wasser an unter Zersetzung. Mit kaltem H_2O bildet S_2O_3 amorphen S, H_2SO_4, SO_2 und Polythionsäuren, dagegen keine $H_2S_2O_4$, als deren Anhydrid man S_2O_3 wegen seiner Zusammensetzung anzusehen geneigt sein würde. Durch Zusatz von S zu S_2O_3 entstehen braune Lösungen, die den überschüssigen S vielleicht in kolloidaler Form enthalten; in SO_3 löst sich S_2O_3 mit blauer Farbe. Mit NH_3 tritt heftige Reaktion ein unter Bildung eines hellroten Körpers unbekannter Zusammensetzung. S_2O_3 wird technisch zur Darstellung einiger Schwefelfarbstoffe angewendet.

Sulfoxylsäure H_2SO_2. Sulfoxylsäure ist nur in Form organischer Derivate bekannt, z. B. als Formaldehydsulfoxylsäure $CH_2O.NaHSO_2.2H_2O$.

Hydroschweflige Säure, $H_2S_2O_4$. Daß Zn sich in wässeriger H_2SO_3 ohne H_2-Entwickelung auflöst, wurde schon früh beobachtet. Schönbein stellte fest, daß die dabei gebildete Lösung stark reduzierende Eigenschaften besitzt und schloß daraus auf die Bildung einer sauerstoffärmeren Säure. Schützenberger isolierte das Na-Salz der Säure, der er die Formel H_2SO_2 gab. Bernthsen stellte die Formel $Na_2S_2O_4$ für das Na-Salz auf, also $H_2S_2O_4$ für die freie

Säure. Die Formel **Bernthsens** wurde durch die analysenreine Darstellung des Zn-Hydrosulfits von der Zusammensetzung ZnS_2O_4 bestätigt.

Man erhält die Salze der hydroschwefligen Säure:

1. durch Auflösen von Metallen, besonders Zn in H_2SO_3;

2. durch elektrolytische Reduktion von Bisulfitlösungen;

3. durch Einwirkung von SO_2-Gas auf Metallhydrüre bei vermindertem Druck (**Moissan**) z. B.:

$$2NaH + 2SO_2 = Na_2S_2O_4 + H_2.$$

Die Konstitution der $H_2S_2O_4$ ist wahrscheinlich:

$$\begin{array}{c} H.SO \\ O \\ H.SO_2 \end{array}$$

Danach wäre $H_2S_2O_4$ das gemischte Anhydrid der Sulfoxylsäure und der schwefligen Säure.

Die freie Säure, die sich durch Fällen der Lösung ihres Ca-Salzes mit Oxalsäure, H_2SO_4, oder H_3PO_4 und durch elektrolytische Reduktion von verdünnten H_2SO_3-Lösungen erhalten läßt, ist sehr unbeständig. Das Ion S_2O_4'' zeigt große Neigung, nach folgendem Schema zu zerfallen: $2S_2O_4'' \rightarrow S_2O_3'' + S_2O_5''$; diese Zersetzung ist ein Beispiel für den freiwilligen Uebergang der mittleren Oxydationsstufe in die niedrigere und höhere. Die entstehenden Ionen sind die Anionen der Thioschwefelsäure ($H_2S_2O_3$) und der pyroschwefligen Säure ($H_2S_2O_5$); das letztere geht in H_2O durch H_2O-Aufnahme sofort in $2HSO_3'$-Ionen über. Das Anion S_2O_3'' ist in saurer Lösung (s. unter $H_2S_2O_3$) nicht beständig, sondern zerfällt in S und SO_3''. Daher zerfällt $H_2S_2O_4$ in freien S und H_2SO_3.

Die Leitfähigkeit von $H_2S_2O_4$ wurde von **Jellinek** gemessen: (c = Konzentration in Aequivalenten/Liter, λ = Aequivalentleitfähigkeit, α der aus λ/λ_∞ berechnete Dissoziationsgrad; 25°):

c	λ	α
1/8	178	0,422
1/16	212	0,502
1/32	234	0,555
1/64	277	0,656
1/128	298	0,705
$1/\infty$	422	(1,000)

Die hydroschweflige Säure ist danach eine starke Säure, deren erste Dissoziationskonstante (entsprechend der Stufe $H_2S_2O_4 \rightleftarrows H^{\cdot} + HS_2O_4'$) etwas kleiner als die der H_2SO_4 sein dürfte. Der Stufe $HS_2O_4' \rightleftarrows H^{\cdot} + S_2O_4''$ entspricht die Konstante 0,00354.

Die relative Wanderungsgeschwindigkeit des S_2O_4''-Ions bei 25° ist 69.

Die Bildungswärme von $H_2S_2O_4$ ist:

$$2S + 3O + H_2O + aq = H_2S_2O_4aq + 105\,000 \text{ cal},$$

die Ionisationswärme des Hydrosulfitions:

$$2S + 4O + aq = S_2O_4''aq + 177\,000 \text{ cal}.$$

Die Hydrosulfite gehen, gemäß der oben angegebenen Zersetzung des S_2O_4''-Ions in S_2O_3'' und S_2O_5'' im festen Zustand allmählich in Thiosulfat und Pyrosulfit, in wässeriger Lösung in Thiosulfat und Bisulfit über. Interessant ist die starke Reduktionskraft der Hydrosulfite.

Die wenig elektroaffinen Kationen $Au^{\cdot}$, $Hg^{\cdot}$, $Ag^{\cdot}$, $Cu^{\cdot\cdot}$ werden zum Metall entladen; bei $Cu^{\cdot\cdot}$ erhält man eine früher für CuH gehaltene kolloidale Cu-Lösung. MnO_4''-, CrO_4''-, $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$-Ionen werden zu Mn'', $Cr^{\cdot\cdot\cdot}$, $F^{\cdot\cdot}$ reduziert, Indigo und andere organische Farbstoffe gebleicht; Indigo wird dabei zu Indigweiß reduziert, aus dem Luftsauerstoff leicht Indigo regeneriert (Anwendung zur Herstellung der Indigoküpe). H_2O_2 oxydiert zu H_2SO_4 und etwas $H_2S_2O_6$. Auch durch freien O werden Hydrosulfite glatt oxydiert, zum größeren Teil zu Sulfat, zum kleineren zu Sulfit; daher dient $Na_2S_2O_4$ in der Gasanalyse als Absorptionsmittel für O.

Das Reduktionspotential des Vorgangs: $S_2O_4'' + H_2O \rightleftarrows S_2O_5'' + H_2$ (oder, elektromotorisch wirksam formuliert: $S_2O_4'' + 2H_2O + 2 \oplus \rightleftarrows 2H^{\cdot} + 2HSO_3'$), wurde von **Jellinek** bestimmt. In sauren Lösungen läßt sich die umkehrbare Sulfit-Sulfatelektrode realisieren; das Normalpotential (für Einheitskonzentration der reagierenden Ionen) ist, bezogen auf die 0,1-normale Wasserstoffelektrode = —0,245 Volt. Der Druck, mit welchem an einer Hydrosulfit-Bisulfitelektrode H_2 entwickelt wird, läßt sich daraus zu 1 bis 2 Atmosphären berechnen, d. h. die Reduktionskraft von Hydrosulfit und H_2 von 1 Atmosphäre ist annähernd gleich. Wenn Hydrosulfit viel energischer reduzierend wirkt als H_2, so liegt das nur an der Reaktionsträgheit des H.

Schwefeldioxyd, SO_2. Geschichte: Schon in alter Zeit als Verbrennungsprodukt von S bekannt und als desinfizierendes Mittel benutzt; näher beschrieben zuerst von **Libavius**, von **Lavoisier** wurde seine wässerige Lösung als Säure von geringerem Sauerstoffgehalt als H_2SO_4 erkannt. Vorkommen in vulkanischen Gegenden als Exhalation (bekannt ist z. B. die „Solfatara" bei Neapel) sowie in der Atmosphäre der Städte und der Umgebung von Fabrikanlagen. Bildungsweisen: Bei der Verbrennung von S in Luft entsteht fast ausschließlich SO_2 neben geringen Mengen SO_3. SO_2 entsteht beim Abrösten der Metallsulfide (Kiese, Blenden usw.) an der Luft. Ferner bei der Zersetzung von Thio-

sulfaten und Polythionsäuren. Aus H_2SO_4 wird SO_2 durch Reduktion erhalten; besonders leicht aus konzentrierter H_2SO_4 durch Erhitzen mit Kohle (man erhält hierbei das Gas mit dem gleichen Volum CO verunreinigt), S, Metallen; beim Durchleiten von H durch konz. H_2SO_4 bildet sich SO_2 etwa bei 160°, in Gegenwart von Pt schon bei Zimmertemperatur; aus SO_3 bildet sich SO_2 ferner durch partiellen Zerfall bei hoher Temperatur: $SO_3 = SO_2 + O$. Im Laboratorium wird SO_2 am bequemsten dargestellt durch Erhitzen von 1 Teil konz. H_2SO_4 mit $^1/_3$ Teil Cu oder 1 Teil Hg; in der Technik durch Verbrennen von Rohschwefel oder Rösten von Pyrit (FeS_2), Zinkblende usw. Gereinigt wird das Gas durch Kompression zur Flüssigkeit und Destillation.

Physiologische Wirkung: SO_2 ist bei Einatmung ein starkes Gift; schon bei einem Gehalt von 0,04% in der Luft treten nach einigen Stunden Vergiftungserscheinungen auf, bestehend in Atemnot und Trübung der Hornhaut der Augen. Ein Gehalt von 0,02% ist noch erträglich. Besonders stark ist die Giftwirkung des SO_2 auf Pflanzen. Am empfindlichsten reagieren auf SO_2 die Nadelhölzer, besonders die Tanne; von den Laubhölzern ist die Eiche am widerstandsfähigsten. Laubblätter bekommen unter der Einwirkung von SO_2 braune Flecken, Fichtennadeln gelbe Spitzen, schließlich geht die Vegetation ein, oder, bei großer Verdünnung des Gases tritt wenigstens Verkümmerung ein. Derartige Wirkungen hat man in der Nähe von Industrieanlagen häufig zu beobachten Gelegenheit. Viele Pflanzenfarbstoffe werden durch SO_2 gebleicht, teils vorübergehend (der Farbstoff der roten Rose z. B. wird durch Erwärmen oder Behandeln mit verdünnter H_2SO_4 regeneriert), teils dauernd. — Die desinfizierende Wirkung des SO_2 wird vielfach benutzt zum Schwefeln der Weinfässer, zum Konservieren von Nahrungsmitteln usw.

In der Technik wird die größte Menge des erzeugten SO_2 sofort auf SO_3 und H_2SO_4 weiter verarbeitet. SO_2 dient außerdem zur Darstellung von Natriumsulfat, Sulfiten, Thiosulfaten, Hydrosulfiten, es wird gebraucht in der Sulfitzellstoffindustrie, zum Bleichen von Wolle, als ausgezeichnetes Lösungsmittel für viele organische Stoffe, in der Kälteindustrie.

Physikalische Eigenschaften. SO_2 ist bei gewöhnlicher Temperatur ein farbloses Gas von erstickendem Geruch; seine Dichte ist dem einfachen Molekulargewicht entsprechend; bezogen auf Luft = 1 bei 0° und 760 mm nach Leduc = 2,2639. Ein Liter SO_2 wiegt unter Normalbedingungen 2,9267 g. — Die spezifische Wärme des Gases ist, bezogen auf Luft: 0,3416, bezogen auf Wasser: 0,1544. $C_p/c_v = 1,256$. — Der Reibungskoeffizient bezogen auf O = 1 ist 0,645.

Brechungsexponent $n_D = 1,000686$ bei 15°,

$$\frac{n-1}{d} = 0,236; \quad \frac{n^2-1}{n^2+2}\cdot\frac{1}{d} = 0,157$$

Im Ultraviolett zeigt SO_2 ein Absorptionsspektrum mit starkem Band zwischen 377,9 und 263 $\mu\mu$.

SO_2 ist leicht löslich in H_2O. 1 Vol. absorbiert zwischen 0° und 20° bei 760 mm Druck $79,789 - 2,6077\,t + 0,02935\,t^2$ Vol. SO_2. Die Löslichkeit in H_2O folgt nicht dem Henryschen Gesetz, d. h. die aufgenommene Menge ist nicht dem Druck proportional. Bei lange fortgesetztem Kochen entweicht schließlich alles SO_2 aus der Lösung. Ueber das Verhalten der wässerigen Lösung siehe unter H_2SO_3.

Sehr leicht löslich ist SO_2 auch in Alkohol, mäßig löslich in Eisessig, Ameisensäure, Aceton. Konzentrierte H_2SO_4 löst ihr 58-faches Volum an SO_2; 1 Teil Kampfer löst das 308-fache Volum zu eine Flüssigkeit auf. Von Holzkohle wird SO_2 reichlich absorbiert. —

Die Bildungswärme des gasförmigen SO_2 aus S_I und O ist nach Berthelot 69100 cal, nach Thomson 71080. Die Absorptionswärme in H_2O ist: $SO_2 + aq = SO_2aq + 7700$ cal.

Flüssiges und festes SO_2. Man erhält in der Technik flüssiges SO_2 durch Kompression in Druckpumpen aus Phosphorbronze oder Eisen. Wasserhelle leicht bewegliche Flüssigkeit. $d^0_4 = 1,4338$, bei

t	d
35,2	1,337
62,0	1,2523
102,4	1,104
130,3	0,9560
155	0,6370

Sdp. — 10°, Fp. — 72,7°. Kritische Temperatur 154,4° bis 157,3°, kritischer Druck 78,9 Atm. Latente Verdampfungswärme pro g = 91,2 cal bei 0°; spezifische Wärme zwischen 20,6° und 9,8° = 0,3178.

Brechungsexponent $n_D = 1,3384$, $\frac{n-1}{d} = 0,252$, $\frac{n^2-1}{n^2+2}\cdot\frac{1}{d} = 0,153$. Dielektrizitätskonstante DK = 14,8.

SO_2 besitzt in reinem Zustande ein sehr geringes Leitungsvermögen, bei 0° ist die spezifische Leitfähigkeit nach Walden $0,9.10^{-7}$.

Flüssiges SO_2 ist ein gutes Lösungsmittel für P, Aether, Chloroform, Benzol, Harze. Wasser ist wenig löslich (ca. zu 1%) und zwar in der Kälte besser als in der Wärme. — Viele Salze lösen sich in flüssigem SO_2, zum Teil mit charakteristischen Farben.

Die Lösungen leiten die Elektrizität gut, in vielen Fällen besser als gleichkonzentrierte wässerige Lösungen; das elektromotorische Verhalten der Salzlösungen deutet darauf hin, daß die Salze zum Teil in Ionen dissoziiert, zum Teil polymerisiert sind.

Chemisches Verhalten. SO_2 ist als eine mittlere Oxydationsstufe chemisch charakterisiert durch die Fähigkeit sowohl oxydierend wie reduzierend zu wirken.

Durch O wird SO_2 in Gegenwart eines Katalysators zu SO_3 oxydiert. Bei höheren Temperaturen tritt ein Gleichgewichtszustand ein, der sich mit wachsender Temperatur zugunsten der SO_2-Bildung verschiebt (siehe auch unter SO_3). Bleisuperoxyd bildet mit SO_2 unter Erglühen $PbSO_4$. Mit NaCl, H_2O und Luft entsteht Na_2SO_4 (Verfahren von Hargreaves). Nitrate geben beim Erhitzen in SO_2 Sulfate und Stickoxyde. Ueber die Reaktion zwischen SO_2 und HNO_3 oder Stickoxyden siehe bei H_2SO_4. Mit Cl vereinigt es sich zu SO_2Cl_2.

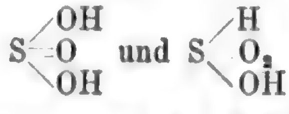
Mit H_2 durch eine glühende Röhre geleitet, wird SO_2 zu S oder H_2S reduziert. Beim Ueberleiten von SO_2 über glühende Kohlen bildet sich CO_2 und S; daneben bilden sich, in kompliziertem Gleichgewicht CO, COS, CS_2. Metalle gehen beim Erhitzen in SO_2 in Oxyde und Sulfide über: Entzündetes Mg-Band brennt in SO_2 unter Bildung von MgO und S weiter. H_2S reagiert nach der Gleichung: $2H_2S + SO_2 = 2H_2O + 3S$. HJ-Gas liefert mit SO_2 Wasser, J und S. Durch Metallhydrüre wird SO_2 zu Hydrosulfit reduziert.

Mit festen Salzen, KJ, KBr, KCl, KCNS u. ä. verbindet sich SO_2 und bildet Additionsverbindungen vom Typus KJ, SO_2.

Bei sehr hohen Temperaturen wird SO_2 in S und SO_3 zerlegt; die gleiche Reaktion findet im elektrischen Funkenstrom und bei intensiver Belichtung statt.

Schweflige Säure, H_2SO_3, und Pyroschweflige Säure, $H_2S_2O_7$. Die wässerige Lösung von SO_2 reagiert stark sauer und enthält die Verbindung H_2SO_3 und deren Ionen. Eine Aenderung des Moleküls beim Lösungsvorgang wird bewiesen durch die oben erwähnte Abweichung vom Henryschen Gesetz. Die Salze der schwefligen Säure entsprechen der Formel H_2SO_3 der freien Säure.

Konstitution: Für die Konstitution der H_2SO_3 kommen zwei Formeln in Betracht, je nachdem man dem S Vier- oder Sechswertigkeit erteilt:



Man kennt organische H_2SO_3-Derivate, welche sich zweifellos von der ersten, symmetrischen, Formel ableiten und ebenso solche, deren Konstitution auf die unsymmetrische zweite Formel führt. Man wird also annehmen müssen, daß H_2SO_3 in beiden, tautomeren, Formen zu reagieren vermag.

Reine H_2SO_3 ist nicht bekannt. Wohl aber kristallisiert aus der wässerigen Lösung ein Hydrat von der Zusammensetzung $H_2SO_3 . 6H_2O$ aus. Fp. 14°. Es finden sich noch einige andere Hydrate beschrieben (mit $5\,H_2O$, $8\,H_2O$, $10\,H_2O$, $14\,H_2O$), welche in Wirklichkeit wohl nicht alle chemische Individuen darstellen. Die Dissoziationsspannung über dem Hydrat $H_2SO_3 . 6H_2O$ ist bedeutend. Bei 7,1° beträgt der SO_2-Druck schon 760 mm. Die Dichte der geschmolzenen Kristalle ist d = 1,147.

Die Dichte wässeriger Lösungen bei 15° beträgt:

% SO_2	d	% SO_2	d
9,54	1,046	4,77	1,020
8,59	1,036	3,82	1,016
7,63	1,031	2,86	1,013
6,68	1,027	1,90	1,009
5,72	1,023	0,95	1,005

Die Bildungswärme ist:

$S + 2O + H_2O + aq = H_2SO_3aq + 78800$ cal.

Die Aequivalentleitfähigkeit von H_2SO_3-Lösungen ist bei 25° (η = Aequivalent/Liter, λ = Aequivalentleitfähigkeit, $\alpha = \lambda/\lambda_\infty$):

η	λ	α
2,075	23,7	0,0559
1,047	32,7	0,0771
0,5164	44,2	0,104
0,1989	67,3	0,159
0,0994	84,8	0,200
0 04995	103,8	0,255
0,02522	122,3	0,288
$1/\infty$	424,0	(1,000)

Als zweibasische Säure vermag H_2SO_3 in den zwei Stufen zu zerfallen: $H_2SO_3 \rightleftarrows H^{\cdot} + HSO_3{}'$ und $HSO_3{}' \rightarrow SO_3{}'' + H^{\cdot}$. Da, wie obige Zahlen zeigen, H_2SO_3 nur eine mittelstarke Säure ist, gehören die angegebenen Werte λ hauptsächlich der ersten Stufe an. Die Grenzleitfähigkeit $\lambda_\infty = 424$ ist die der vollständigen Dissoziation in $2H^{\cdot}$ und $SO_3{}''$. Obwohl wegen der komplizierten Dissoziationsverhältnisse der aus λ/λ_∞ berechnete Dissoziationsgrad eigentlich keine reelle Bedeutung hat, so bildet er doch, wegen der nicht sehr verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeiten von $HSO_3{}'$ und $SO_3{}''$ ein annäherndes Maß für die H-Ionenkonzentration, d. h. für die Azidität der H_2SO_3-Lösungen. Für die Konstante der ersten Stufe findet Jellinek den Wert $K_1 = 0{,}0174$; H_2SO_3 treibt daher die viel schwächere CO_2 aus ihren Salzen aus; der Wert der Konstanten der zweiten Stufe ist sehr viel kleiner, etwa $K_2 = 5.10^{-6}$. Durch Multiplikation von K_1 und K_2 ergibt sich die Konstante des

Gleichgewichtes $H_2SO_3 \rightleftarrows SO_3'' + 2H^{\cdot}$: $K_2 = 8{,}5 . 10^{-8}$.

Die Beweglichkeit des HSO_3'-Ions ist 52, des SO_3''-Ions 80 (bei 25°).

Die Neutralisationswärme beim Vermischen von 1 Mol H_2SO_3 und 2 Mol NaOH ist 28970 cal. Der Unterschied gegen die Neutralisationswärme von 2 Aequivalenten sehr starker Säuren (2.13700) rührt von der unvollständigen Dissoziation her; die Dissoziationswärme für die zweite Stufe ist nach Lundén —340 cal.

Die Ionisationswärme beträgt:

$S + 3O + aq = SO_3''aq + 148500$ cal.

Die schon beim SO_2 hervorgehobene Fähigkeit als Oxydations- und Reduktionsmittel zu wirken, kommt auch dem Sulfition SO_3'' zu. Bei der Oxydation entsteht das SO_4''-Ion der Sulfate oder das S_2O_6''-Ion der Dithionate, bei der Reduktion S_2O_4'', S oder S''.

Das Reduktionspotential des Vorgangs $SO_3'' \rightarrow SO_4''$ läßt sich wegen der mangelnden Umkehrbarkeit der Sulfit-Sulfatelektrode (SO_4'' ist elektromotorisch unwirksam; siehe oben S. 591) nicht angeben. Zur Orientierung dient immerhin, daß eine verdünnte H_2SO_3-Lösung gegen die Normalwasserstoffelektrode ein Potential von + 0,44 Volt zeigt (Bancroft).

Bei der elektrolytischen Oxydation von Sulfiten bildet sich Sulfat; das dazu nötige Anodenpotential wird durch Cu··-Ionen herabgesetzt; bei höherem Potential entsteht auch Dithionat.

Die Oxydation von SO_3'' zu SO_4'' durch O wird durch Zusatz von Mn··, Cu··, Fe··, Co··, Ni··, Zn··, Mg··-Ionen katalytisch beschleunigt; ganz besonders wirksam sind nach Titoff die Cu··-Ionen. Zusatz von geringen Mengen Alkohol, Hydrochinon, oder anderer Reduktionsmittel verzögert die Oxydation. Halogensauerstoffsäuren werden durch SO_3'' in saurer Lösung ebenfalls reduziert. Die Reaktion zwischen HJO_3 und H_2SO_3 verläuft nach den Gleichungen:

I. $3H_2SO_3 + HJO_3 = 3H_2SO_4 + HJ$,
II. $5HJ + HJO_3 = 3H_2O + 6J$
III. $2J + H_2SO_3 + 2H_2O = H_2SO_4 + 2HJ$.

Die nach I entstandene HJ wird durch noch vorhandene HJO_3 nach II zu freiem J oxydiert, welches seinerseits, solange noch H_2SO_3 vorhanden ist, sofort nach III in HJ übergeführt wird; erst im Moment, wo alle H_2SO_3 verbraucht ist, tritt plötzlich freies J auf.

HNO_3 und HNO_2 oxydieren zu SO_4''. HNO_2 bildet mit H_2SO_3 aber auch unbeständige Kondensationsprodukte, welche als Zwischenkörper bei der Oxydation auftreten können (vgl. hierzu Abegg, Handbuch der anorganischen Chemie III, 3, S. 151). NO und H_2SO_3 können unter bestimmten Bedingungen unter Bildung von N_2O aufeinander einwirken. Aus Lösungen von H_2SeO_3 und H_2TeO_3 fällt SO_2 elementares Se und Te, den wenig elektropositiven Metallionen Hg··, Ag·, Au··· werden durch SO_3''-Ion die Ladungen entzogen und die Metalle, sofort oder beim Erwärmen, ausgefällt.

Metallsuperoxyde oxydieren H_2SO_3 im allgemeinen nur bis zur Dithionsäure $H_2S_2O_6$. Der Addition von O analog ist die von S; dabei entsteht aus SO_3'' das Thiosulfation S_2O_3''.

Als Reduktionsmittel wirkt nascierender H auf H_2SO_3; beim Auflösen von Zn in H_2SO_3 entsteht Hydrosulfit; beim Erhitzen mit wässeriger H_2SO_3 auf 200° bilden die meisten Metalle Sulfid.

Die Sulfite der Alkalimetalle sind leicht in Wasser löslich, alle übrigen schwer löslich in Wasser, aber löslich in starken Säuren; die nicht sehr stark saure Natur der H_2SO_3 zeigt sich darin, daß die schwächeren Basen leicht basische Salze bilden.

Die Sulfite sind den Karbonaten isomorph und zeigen mit ihnen in Form, Löslichkeit und Kristallwassergehalt oft große Uebereinstimmung.

Die sauren Sulfite der Alkalien und Erdalkalien sind leicht löslich; sie riechen stark nach SO_2 und reagieren schwach sauer. In wässeriger Lösung zeigen die Sulfite die Reaktionen des SO_3''-Ions.

Beim Erhitzen zerfallen die Sulfite der Alkalien, des Pb und einiger anderer Metalle in Sulfat und Sulfid: $4PbSO_3 = 3PbSO_4 + PbS$.

Es sind Doppelsulfite bekannt, die zum Teil sich wie gewöhnliche Doppelsalze verhalten, d. h. keine sehr beständigen Komplexe enthalten (Verbindungen der Alkalisulfite mit den Sulfiten von Fe, Zn, Mn, Ni, Cd, Co··), zum Teil stark komplexe Verbindungen darstellen (hierher gehören besonders die kobaltischwefligsauren Salze, von Co··· sich ableitend).

Analytische Chemie: SO_2 wird leicht am Geruch erkannt. SO_3''-Ion wird durch folgende Reaktionen nachgewiesen:

1. Kaliumjodatstärkepapier wird durch J-Abscheidung blau gefärbt.
2. $KMnO_4$ wird entfärbt.
3. $HgNO_3$ wird zu Hg reduziert.
4. $AgNO_3$ fällt aus neutralen SO_3''-Lösungen weißes Ag_2SO_3 aus, das beim Kochen in Ag und Ag_2SO_4 zerfällt.
5. Ba··-, Ca··-, Sr··-Salze geben weiße Niederschläge von $BaSO_3$, $CaSO_3$, $SrSO_3$. Die Niederschläge sind in Säuren löslich (Unterschied von H_2SO_4). Die Schwerlöslichkeit nimmt in der Reihenfolge Ba, Sr, Ca ab.

6. Neutrale Sulfitlösungen geben mit Nitroprussidnatrium und viel $ZnSO_4$ eine rosenrote Färbung.

Quantitativ wird SO_3''-Ion gravimetrisch nach Oxydation zu SO_4 als $BaSO_4$ bestimmt.

Maßanalytisch läßt sich SO_3''-Ion durch Titration mit $KMnO_4$ oder mit J bestimmen, freie H_2SO_3 auch durch Titration mit NaOH; hierbei zeigt Phenolphtalein als Indikator beim Punkt der Bildung des neutralen Sulfits den Umschlag, Methylorange dagegen zeigt den Punkt der Bildung des sauren Sulfits an.

Pyroschweflige Säure, $H_2S_2O_5$. Durch Austritt von 1 Mol H_2O aus 2 Mol H_2SO_3 leitet sich eine Säure $H_2S_2O_5$ ab, von der nur Salze bekannt sind. Man erhält die Alkalisalze kristallisiert durch Einleiten von SO_2 in Alkalikarbonatlösung oder durch Sättigen der Lösung von Alkalisulfiten mit SO_2, sowie durch Oxydation von Alkalihydrosulfiten: $Na_2S_2O_4 + O = Na_2S_2O_5$.

An der Luft sind die Pyrosulfite ziemlich beständig; beim Erhitzen zerfallen sie nach der Gleichung: $2K_2S_2O_5 = 2K_2SO_4 + S + SO_2$. In verdünnter Lösung gehen die Pyrosulfite durch H_2O-Aufnahme vollständig in Bisulfite über und zeigen die Reaktionen des SO_3''-Ions.

Halogenderivate der schwefligen Säure:

Thionylchlorid, $SOCl_2$, ist das Chlorid der schwefligen Säure. Es entsteht nach der Gleichung: $SO_3 + SCl_2 = SOCl_2 + SO_2$ als farblose, an der Luft rauchende, die Schleimhäute angreifende Flüssigkeit. Dichte d = 1,68. Kp. 78 bis 82°. Bei 150° fängt der Dampf an, sich zu zersetzen. Molekulargewicht in Benzol und Chloroform normal.

Bildungswärme aus S_I, O und Cl = 40800 cal. Die spezifische Wärme zwischen 17° und 60° ist 0,242.

Durch H_2O wird $SOCl_2$ zu SO_2 und HCl hydrolysiert. HBr liefert durch doppelte Umsetzung $SOBr_2$ und HCl; HJ reagiert nach:

$$2SOCl_2 + 4HJ = 4HCl + 4J + SO_2 + S.$$

NH_3 gibt Schwefelstickstoff und Polythionate.

Aehnliche Eigenschaften wie $SOCl_2$ zeigen die analogen Verbindungen SOF_2, $SOBr_2$ und SOClBr.

$S_2O_5Cl_2$, das Chlorid der Pyroschwefligen Säure, ist ebenfalls bekannt. Es bildet eine farblose Flüssigkeit: Kp. 143°; Fp. 39°.

Schwefeltrioxyd, SO_3, Schwefelsäureanhydrid. Schwefeltrioxyd wird von Basilius Valentinus zuerst erwähnt, von Scheele und Guyton de Morveau wurde es für das Anhydrid von Schwefelsäure erklärt. SO_3 bildet sich in der Hitze, im elektrischen Funken und im Licht aus SO_2 nach der Gleichung: $3SO_2 = 2SO_3 + S$; beim Verbrennen des S und beim Abrösten von Kiesen entsteht neben viel SO_2 auch etwas SO_3. Ueber die Bildung aus SO_2 und O siehe unten. Man stellt SO_3 dar durch Destillation von konz. H_2SO_4 mit P_2O_5, durch Destillation von rauchender Schwefelsäure, oder durch trockene Destillation von Eisen(III)sulfat; technisch aus SO_2 und O nach dem Kontaktverfahren; es wird in der Industrie organischer Farbstoffe vielfach zum Sulfurieren und Oxydieren angewandt.

Von SO_3 sind zwei Modifikationen bekannt, von denen die eine (α-SO_3) bei gewöhnlicher Temperatur flüssig, die andere (β-SO_3) fest ist. α-SO_3, welches aus dem Dampf durch Kondensation erhalten wird, ist bei gewöhnlicher Temperatur instabil und geht allmählich in β-SO_3 über.

α-SO_3 bildet bei niedriger Temperatur (Fp. 16°) lange durchsichtige Kristalle von prismatischer Gestalt und eisartigem Aussehen. $d^{13}_4 = 1{,}955$, geschmolzen $d^{11}_4 = 1{,}944$. Kp. 46° bei 760 mm. Dampfspannung 200 mm bei 20°. Kritische Temperatur 216°. Das Molekulargewicht von α-SO_3 aus der Dichte des Dampfes berechnet, ergibt einfaches Molekulargewicht; auch in $POCl_3$-Lösung fand Oddo die Molekulargröße SO_3. Brechungsexponent für die D-Linie bei 20° n = 1,40965; $\frac{n-1}{d} = 0{,}2105$, $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{d} = 0{,}1273$ für die Linie H_α.

Dielektrizitätskonstante DK = 3,64. Im reinen Zustand leitet α-SO_3 die Elektrizität sehr schlecht und erteilt auch gelösten Salzen keine Leitfähigkeit.

β-SO_3 bildet sich beim Aufbewahren oder Erwärmen aus α-SO_3. Feine Nadeln von asbestartigem Aussehen, welche bei Temperaturen über 50°, jedoch nicht bei einem bestimmten Punkt unter teilweisem Uebergang in α-SO_3 schmelzen. Es scheint im flüssigen Zustand ein mit Temperatursteigerung zugunsten von α-SO_3 sich verschiebendes Gleichgewicht zu bestehen. Das Molekulargewicht von β-SO_3 fand Oddo in $POCl_3$ gleich S_2O_6.

Bildungswärme: $S_I + 3O = \alpha$-SO_3 + 103230 cal (Thomson)
+ 103600 cal (Berthelot).

Bei höherer Temperatur zerfällt SO_3-Dampf partiell nach $2SO_3 \rightleftarrows 2SO_2 + O_2$, wie sich auch umgekehrt aus SO_2 und O SO_3 bildet. Das Gleichgewicht ist technisch außerordentlich wichtig, da es die Grundlage des Kontaktverfahrens zur Herstellung von H_2SO_4 bildet. Ausführliche Untersuchungen über die Lage des Gleichgewichts bei verschiedenen Temperaturen liegen von Knietsch, Bodländer und Köppen, Bodenstein und Pohl vor.

Nach dem Massenwirkungsgesetz ist, wenn wir mit Partialdrucken rechnen:

$$\frac{p_{SO_3}}{p_{SO_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}} = K_p$$

oder, wenn wir der Einfachheit halber für die Drucke die Moleküle schreiben:

$$\frac{SO_3}{SO_2} = K_p \sqrt{O_2};$$

d. h. das Verhältnis von SO_3 zu SO_2 im Gleichgewicht vergrößert sich proportional der Wurzel aus dem O-Gehalt. Im übrigen hängt das Verhältnis $\frac{SO_3}{SO_2}$ ab von der Größe der Konstanten K_p; dieselbe nimmt mit steigender Temperatur stark ab, wie aus folgender Tabelle hervorgeht:

t°	K_p.
528	31,3
579	13,8
627	5,54
680	3,24
727	1,86
789	0,956
832	0,627
897	0,358

Die Bildungswärme des gasförmigen SO_3 aus SO_2 und O_2 berechnet Bodenstein aus diesen Daten zu 21700 cal. Für die Technik kommt es hauptsächlich auf die Ausbeute an, d. h. die Menge SO_3, die aus einer gegebenen Menge SO_2 entsteht. Wenn wir die Ausbeute mit x bezeichnen, so ist also $x = \frac{SO_3}{SO_2 + SO_3}$. Der Quotient $\frac{SO_3}{SO_2}$ wird dann: $\frac{SO_3}{SO_2} = \frac{x}{1-x}$, also $\frac{x}{1-x} = K_p \sqrt{O_2}$, oder: $x = \frac{K_p \cdot \sqrt{O_2}}{1 + K_p \sqrt{O_2}}$. Eine Anschauung von den im Gleichgewicht zu erzielenden Ausbeuten geben folgende Zahlen, die technischen Verhältnissen entsprechen:

Zusammensetzung des Gases			t in °C	K_p	x in %
% SO_2	% O_2	% N_2			
7	10,4	82,6	434	181	99
7	10,4	82,6	550	20,4	85
7	10,4	82,6	645	5,14	60

Bei niedriger Temperatur findet demnach praktisch quantitative Vereinigung statt, bei höheren wird die Ausbeute immer ungünstiger; bei Temperaturen über 1000° ist SO_3 so gut wie vollständig in seine Komponenten zerfallen. — Die Schwierigkeit des Verfahrens liegt in der sehr geringen Geschwindigkeit, mit welcher das Gleichgewicht sich in dem für die Ausbeute günstigen Temperaturgebiet einstellt, durch Anwendung von Katalysatoren kann dieselbe aber gesteigert werden. Nach bekannten Sätzen der Thermodynamik wird die Lage des Gleichgewichts durch Katalysatoren nicht beeinflußt, die Reaktion der Bildung wie des Zerfalls also im gleichen Maße beschleunigt. Der beste Katalysator für die Reaktion ist feinverteiltes Platin, das in Form von Platinasbest zur Verwendung kommt; es zeigt seine günstige Wirkung schon in der Gegend von 400°; durch geringe Verunreinigung der Gase, namentlich durch (aus den zur Herstellung des SO_2 verwendeten Kiesen stammende) Arsenverbindungen wird die katalytische Wirksamkeit des Pt schnell vernichtet. Die Gase müssen deshalb vor ihrem Eintritt in den Reaktionsraum mit großer Sorgfalt gereinigt werden. Alle anderen vorgeschlagenen Katalysatoren, von denen der beste noch Eisenoxyd ist, fangen erst bei wesentlich höherer Temperatur zu wirken an, wo die Gleichgewichtslage schon weniger günstig ist.

Die Bildung von SO_3 ist eine lichtempfindliche Reaktion; wirksam sind Strahlen von Wellenlängen $< 265\ \mu\mu$. Coehn und Becker untersuchten die photochemische Vereinigung von SO_2 und O und fanden bei Bestrahlung mit Quarzquecksilberlampe ein von beiden Seiten her erreichbares Gleichgewicht, das unter den Verhältnissen ihrer Versuchsanordnung bei 65% SO_3 lag; da bei der Reaktionstemperatur 160° im Dunkelgleichgewicht quantitativ SO_3 hätte existieren müssen, so gehört die photochemische SO_3-Bildung zu der Klasse der arbeitspeichernden Reaktionen (vgl. den Artikel „Photochemie"). Das Lichtgleichgewicht zeigte sich unabhängig von der Temperatur von 160° bis 800°. Die Geschwindigkeit der Reaktion ist sehr groß; bei 150° waren in 5 Minuten schon 20% SO_3 gebildet. Fehlen von H_2O-Dampf verhindert die Reaktion.

Die beiden Modifikationen zeigen die gleichen chemischen Reaktionen, nur reagiert α-SO_3 im allgemeinen lebhafter als β-SO_3.

Der sechswertige S des SO_3 geht durch Reduktion leicht in vier- und zweiwertigen über; SO_3 ist daher ein kräftiges Oxydationsmittel. P entzündet sich in SO_3-Dämpfen, PH_3 über trockenes SO_3 geleitet, gibt SO_2 und P. HBr und HJ werden zu Br und J oxydiert, PCl_3 zu $POCl_3$. Metalle reduzieren SO_3 unter Bildung von SO_2 und Oxyden, die sich mit weiterer SO_3 zu Sulfaten verbinden. Fe und Zn geben bei Rotglut Sulfid.

Mit S vereinigt sich SO_3 zu blauem S_2O_3, mit Se zu grünem $SSeO_3$, mit Te zu rotem $STeO_3$. Mit Jod gibt SO_3 die Additionsverbindung $J(SO_3)_3$. Flüssiges SO_2 und SO_3 sind in jedem Verhältnis mischbar, mit SeO_2 existiert die Verbindung $SeO_2 \cdot SO_3$. An N_2O_4 addiert sich SO_3 ebenfalls und liefert $NO_2 \cdot SO_3$, welches beim Erwärmen in $NO_2 \cdot S_2O_7$ übergeht, mit HNO_3 entsteht $SO_3 \cdot N_2O_5(H_2SO_4)_3$, mit P_2O_5 die Verbindung

$3SO_3.P_2O_5$. Verbindungen von SO_3 und As_2O_3 sind eine ganze Reihe bekannt. Von Alkalichloriden wird SO_3 absorbiert; es entstehen chlorschwefelsaure Salze und SO_3-reichere Verbindungen; beim Erhitzen mit NaCl bildet sich $S_2O_5Cl_2$ und Cl.

Mit H_2O vereinigt sich SO_3 sehr energisch unter oft explosionsartiger Reaktion. An feuchter Luft bildet SO_3 weiße Nebel durch Bildung von H_2SO_4. Die Wärmetönung beim Auflösen in viel H_2O ist 39200 cal.

Schwefelsäure, H_2SO_4 und Pyroschwefelsäure, $H_2S_2O_7$. H_2SO_4 ist wahrscheinlich schon seit langem bekannt; die erste ausführlichere Nachricht über sie stammt von Basilius Valentinus, der ihre Darstellung durch trockene Destillation von Eisenvitriol, mit Kieselsteinen gemischt, und durch Verbrennung von S mit Salpeter beschreibt. Die konzentrierte Säure heißt bei ihm „Sulphur philosophorum“, die verdünnte „Mercurius philosophorum“. Libavius stellte fest, daß die nach den verschiedenen Methoden dargestellte Säure ein und derselbe Stoff ist; Scheele erkannte zuerst den Zusammenhang zwischen SO_3 und H_2SO_4 richtig. In England stellte man zuerst H_2SO_4 fabrikmäßig durch Verbrennen von S mit Salpeter her (daher der Name „englische Schwefelsäure“), aus welcher Methode sich allmählich das Bleikammerverfahren entwickelt hat. Auf dem Kontinent wurde früher durch Destillieren von $Fe_2(SO_4)_3$ eine SO_3-haltige, rauchende Schwefelsäure, die „Nordhäuser Schwefelsäure“, hergestellt. Die Entwickelung des Kontaktverfahrens gehört der neuesten Zeit an.

Vorkommen: H_2SO_4 kommt in freiem Zustand in vulkanischen Quellen vor; ferner in der Luft von Industriestädten. Einige Mollusken scheiden freie H_2SO_4 in ihren Speicheldrüsen aus, z. B. Dolium galea. Die Sulfate der Metalle K, Na, Ba, Sr, Ca, Mg, Al, Zn, Pb, Fe, Cu sind sehr verbreitet.

Physiologische Wirkung: konz. H_2SO_4 übt auf alle organischen Gewebe eine zerstörende und verkohlende Wirkung aus; in verdünntem Zustand zeigt sie spezifische toxische Wirkungen.

Bildung und Darstellung: H_2SO_4 oder ihre Salze bilden sich bei Gegenwart von Wasser aus allen sauerstoffärmeren S-Verbindungen durch genügend kräftige Oxydation. Zur Darstellung dienen heute im wesentlichen zwei Verfahren, der Kontakt- und der Bleikammerprozeß. Ausgangsmaterial für beide Verfahren bildet ein durch Abrösten von Kiesen u. dgl. gewonnenes Gemisch von SO_2 und Luft.

1. Kontaktverfahren; seine Grundlagen wurden schon beim SO_3 beschrieben; das bei 400° aus dem Reaktionsgemisch unter dem Einfluß der Kontaktsubstanz praktisch quantitativ gebildete SO_3 wird von H_2O nur schwierig absorbiert, weil sich das reaktionsfähige α-SO_3 bei Anwesenheit von H_2O rasch in das trägere β-SO_3 umwandelt. Man verwendet daher als Absorptionsmittel eine H_2SO_4 von 97% bis 99% Gehalt. Das Kontaktverfahren liefert direkt eine hochprozentige und wegen der im Interesse der Wirksamkeit des Katalysators nötigen Reinigung der Gase sehr reine, besonders arsenfreie Säure. Durch Auflösen des SO_3 im Ueberschuß erhält man die rauchende Schwefelsäure, „Oleum“, in der die Verbindung $H_2S_2O_7$ anzunehmen ist.

2. Der Bleikammerprozeß; beruht ebenfalls auf einer Katalyse der Reaktion: $SO_2 + O = SO_3$, und zwar durch HNO_3 oder Stickoxyde bei Gegenwart von Wasserdampf. Der Mechanismus der Katalyse ist der, daß Salpetersäure und Stickoxyde Sauerstoff an SO_2 abgeben und selbst durch O wieder oxydiert werden. Am einfachsten lassen die Vorgänge sich folgendermaßen formulieren:

$$3SO_2 + 2HNO_3 + 2H_2O = 3H_2SO_4 + 2NO.$$

NO kann entweder wieder Salpetersäure geben:

$$2NO + 3O + H_2O = 2HNO_3,$$

oder NO_2:

$$NO + O = NO_2,$$

welches ebenfalls imstande ist, SO_2 zu oxydieren unter Rückbildung von NO:

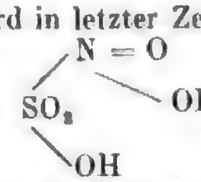
$$SO_2 + H_2O + NO_2 = H_2SO_4 + NO.$$

In Wirklichkeit verläuft die Reaktion erheblich verwickelter; ein zweiter Reaktionsweg, der zur Bildung von H_2SO_4 führt, ist folgender: SO_2 und HNO_3 können zu einer Verbindung: $SO_2{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{ONO}{OH}$, Nitrosylschwefelsäure, auch Bleikammerkristalle genannt, zusammentreten, welche durch H_2O in H_2SO_4 und HNO_2, salpetrige Säure, zerlegt wird:

$$SO_2 + HNO_3 = SO_2{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{ONO}{OH}.$$

$$SO_2{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{ONO}{OH} + H_2O = SO_2{<}\genfrac{}{}{0pt}{}{OH}{OH} + HNO_2.$$

HNO_2 ist unbeständig, zerfällt in H_2O und N_2O_3, dieses weiter in NO und NO_2. Das Gemisch dieser Stoffe mit O reagiert mit SO_2 wie HNO_3 und gibt wieder Nitrosylschwefelsäure usw.

Als Zwischenprodukt wird in letzter Zeit auch die Nitrosisulfosäure  angenommen, welche aus Nitrosylschwefelsäure durch Reduktion mit SO_2 entstehen kann und bei höherer Temperatur direkt

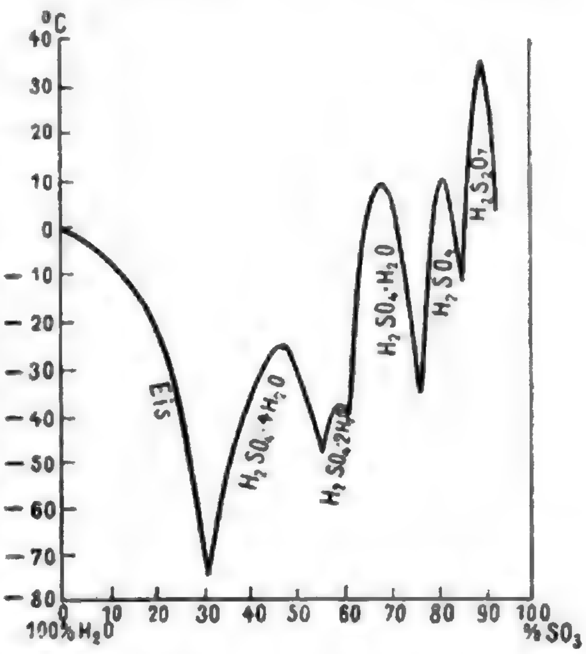
in H_2SO_4 und NO zerfällt, oder auch durch O zunächst wieder zu Nitrosylschwefelsäure oxydiert werden kann. Um die Aufklärung des Bleikammerprozesses haben sich besonders Clément und Désormes verdient gemacht, welche erkannten, daß zur Oxydation des SO_2 viel geringere als die stöchiometrischen Mengen HNO_3 ausreichen, in neuerer Zeit besonders Lunge und Raschig. Welche der verschiedenen vorgeschlagenen Erklärungsweisen den Mechanismus der Reaktion am richtigsten darstellt, ist schwer zu entscheiden; vermutlich laufen mehrere der denkbaren Reaktionen nebeneinander ab, je nach den Bedingungen die eine oder andere vorherrschend. Jedenfalls aber könnte man, bei idealem Verlauf, mit einer begrenzten Menge HNO_3 beliebige Mengen SO_2 oxydieren. Zu einem geringen Bruchteil tritt aber eine noch weitergehende Reduktion des NO_2 bis zu N_2O ein, welches unter den gegebenen Bedingungen sich nicht mehr mit O vereinigt, also für die weitere Reaktion verloren ist. Die Verluste betragen heute noch 0,5 bis 1 kg Salpeter auf 100 kg konz. H_2SO_4. — Man läßt die Reaktion wegen der Angreifbarkeit der meisten Materialien durch H_2SO_4 in Reaktionsräumen aus Pb, den sogenannten Bleikammern, vor sich gehen. Auf die technische Durchführung im einzelnen kann hier nicht eingegangen werden.

Nach dem Bleikammerverfahren wird eine verdünnte Säure erhalten, welche durch Eindampfen konzentriert wird. Die Bleikammersäure enthält von Verunreinigungen besonders As; hiervon sowie von Pb, Cu, Sb läßt sie sich durch Einleiten von H_2S befreien.

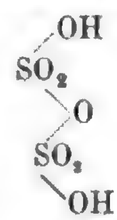
Anwendung: H_2SO_4 bildet in der chemischen Industrie einen der wichtigsten Stoffe. Mit ihrer Hilfe werden die meisten anderen Säuren in freiem Zustand dargestellt. Große Mengen werden in der Fabrikation von Kunstdünger (Aufschließung von Phosphaten zu „Superphosphaten, Darstellung von Ammoniumsulfat) verbraucht. Die Industrien der Sprengstoffe, Farbstoffe, Mineralöle, des Thonerdesulfats brauchen H_2SO_4. Die Produktion in Deutschland und England wird auf je über eine Million Tonnen geschätzt.

Hydrate des SO_3, Schwefelsäure und Pyroschwefelsäure: SO_3 bildet eine Reihe von Hydraten; Salze leiten sich ab von $SO_3.H_2O = H_2SO_4$ und von $2SO_3.H_2O = H_2S_2O_7$, Pyroschwefelsäure. Die Gestalt der Gefrierpunktskurve von SO_3-H_2O-Gemischen (Fig. 1) beweist die Existenz von $H_2S_2O_7$, H_2SO_4, $H_2SO_4.H_2O$, $H_2SO_4.2H_2O$, $H_2SO_4.4H_2O$. Die Maxima geben Zusammensetzung und Schmelzpunkte der Hydrate an, die Minima entsprechen den eutektischen Gemischen und ihren Erstarrungspunkten.

$2SO_3.H_2O$, farblose Kristalle von der Zusammensetzung der Pyroschwefelsäure,

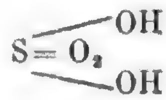


Fp. 36°. Kristallisiert aus stark rauchender Schwefelsäure. Konstitution vermutlich:



H_2SO_4 ($SO_3.H_2O$), sogenanntes Schwefelsäuremonohydrat. Wird erhalten durch Ausfrieren aus gewöhnlicher konz. H_2SO_4 oder durch Mischen von SO_3 und H_2O im berechneten Verhältnis. Die Verbindung H_2SO_4 bildet hexagonale Kristalle; $d^{17}_{4} = 1{,}837$, Fp. 10,5°. Schmelzwärme 800 cal pro Mol. Spezifische Wärme 0,355 zwischen 22° und 80°. Brechungsexponent: $n_D = 1{,}428$. Die Bildungswärmen des geschmolzenen H_2SO_4 aus S, 3O und H_2O ist 124000 cal (Berthelot), 124570 (Thomson). H_2SO_4 hat schon bei 30 bis 40° einen merkbaren SO_3-Dampfdruck; im Dampfzustand ist H_2SO_4 weitgehend dissoziiert, bei 350° unter Atmosphärendruck zu ca. 50%. Das Sieden von H_2SO_4 beginnt bei 290°. Der Dampf enthält einen Ueberschuß von SO_3, so daß die zurückbleibende Flüssigkeit wasserreicher wird. Gleichzeitig steigt der Siedepunkt und erreicht bei 338° ein Maximum, bei dem Flüssigkeit und Dampf gleiche Zusammensetzung, 98,3% H_2SO_4, zeigen; die gleiche Konzentration läßt sich natürlich auch beim Eindampfen verdünnter wässeriger H_2SO_4 nicht überschreiten. Als

Konstitution der H_2SO_4 wird nach Drechsel allgemein angenommen:



$H_2SO_4 . H_2O$ kristallisiert häufig im Winter aus Schwefelsäureballons aus.

Höhere Hydrate als $H_2SO_4 . 4H_2O$ sind in fester Form nicht bekannt. In flüssigem Zustand sind die Hydrate zweifellos ebenfalls beständig; darauf deutet schon die starke Wärmeentwickelung beim Vermischen von H_2SO_4 mit H_2O hin. Dieselbe beträgt beim Lösen in viel H_2O 179000 cal. Die Gemische von SO_3 und Wasser teilen mit anderen Lösungen die Eigenschaft, daß sich viele ihrer physikalischen Eigenschaften bei variierter Zusammensetzung nicht kontinuierlich ändern; die sich ergebenden Unstetigkeitspunkte hat man als Beweis der Existenz der Hydrate der betreffenden Zusammensetzung angesehen. Am besten bewiesen dürfte außer von H_2SO_4 die Existenz von $H_2SO_4 . H_2O$ und $H_2SO_4 . 2H_2O$ sein. In verdünnter wässeriger Lösung liegt vermutlich alle H_2SO_4 in Form von $H_2SO_4 . 2H_2O$ oder eines noch höheren Hydrates vor.

Das spezifische Gewicht von H_2SO_4-Lösungen dient häufig zur Gehaltsbestimmung; Lunge und Isler geben folgende Tabelle:

% H_2SO_4	d_{15}	% H_2SO_4	d_{15}
0	1,000	61,59	1,520
1,57	1,010	63,43	1,540
3,03	1,020	65,08	1,560
4,49	1,030	66,71	1,580
5,96	1,040	68,51	1,600
7,37	1,050	70,32	1,620
8,77	1,060	71,99	1,640
10,19	1,070	73,64	1,660
11,60	1,080	75,42	1,680
12,99	1,090	77,17	1,700
14,35	1,100	78,04	1,710
17,01	1,120	78,92	1,720
19,61	1,140	79,80	1,730
22,19	1,160	80,86	1,740
24,76	1,180	81,56	1,750
27,32	1,200	82,44	1,760
29,84	1,220	83,32	1,770
32,38	1,240	84,50	1,780
34,57	1,260	85,70	1,790
36,87	1,280	86,90	1,800
39,19	1,300	88,30	1,810
41,50	1,320	90,05	1,820
43,74	1,340	92,10	1,830
45,88	1,360	93,43	1,835
48,00	1,380	95,60	1,840
50,11	1,400	97,00	1,841
52,15	1,420	97,70	1,8415
54,57	1,440	98,20	1,841
55,97	1,460	99,20	1,840
57,83	1,480	99,70	1,839
59,70	1,500	99,95	1,8385

Ein geringer Gehalt an Verunreinigungen (As_2O_3, HNO_3) erhöht die Dichte merklich. — In der Technik wird der Gehalt häufig nach Graden Beaumé angegeben. Die gewöhnliche konzentrierte H_2SO_4 des Handels entspricht 66° Beaumé. Mischungen, welche mehr SO_3 als der Zusammensetzung H_2SO_4 entspricht enthalten, bilden die „rauchende Schwefelsäure, „Oleum"; sie enthalten das Hydrat $H_2S_2O_7$. Von 35% überschüssigem SO_3 an sind diese Mischungen bei gewöhnlicher Temperatur fest, von ca. 60% an wieder flüssig, bei 80% wieder fest.

Die Dichte rauchender Schwefelsäure beträgt bei

Gesamt-SO_3 in %	„freies" SO_3 in %	d_{15}
83,46	10	1,888
85,30	20	1,920
87,14	30	1,957
88,97	40	1,979
90,81	50	2,009
92,65	60	2,020
94,48	70	2,018
96,32	80	2,008
98,16	90	1,990
100	100	1,984

Die Dampfdrucke über konzentrierten H_2SO_4-Lösungen sind sehr klein (Anwendung der H_2SO_4 als Trockenmittel). Nach Dieterici ist bei 0°:

Konzentration (Normalität)	Dampfdruck in mm Hg
0,607	4,535
2,681	4,065
4,908	3,238
8,164	2,077
16,19	0,569
22,18	0,164

Reine H_2SO_4 zeigt ein Minimum der elektrischen Leitfähigkeit. Auf gelöste Salze wirkt sie als Ionisierungsmittel.

In wässerigen Lösungen ist H_2SO_4 weitgehend dissoziiert: H_2SO_4 gehört zu den starken Säuren, steht jedoch etwas hinter HNO_3 und HCl zurück. Die Leitfähigkeit verdünnter Lösungen bei 25° ist (η = Aequivalent/Liter, λ = Aequivalentleitfähigkeit, $\alpha = \lambda/\lambda_\infty$):

η	λ	α
0,5	227	0,519
0,2	237	0,542
0,1	249	0,570
0,05	281	0,643
0,02	318	0,728
0,01	342	0,783
0,005	366	0,838
0,002	390	0,893
0,001	401	0,913
$1/\infty$	437	(1,000)

Obwohl in dem vorliegenden Konzentrationsintervall beide Dissoziationsstufen $H_2SO_4 \rightleftarrows H^{\cdot} + HSO_4'$ und $HSO_4' \rightleftarrows H^{\cdot} + SO_4''$ gleichzeitig statthaben, ist α doch,

wegen der annähernd gleichen Beweglichkeit von HSO_4' und SO_4'' ein ziemlich richtiges Maß für die H·-Ionenkonzentration. Eine 0,1 normale H_2SO_4-Lösung ist also z. B. 0,057-normal in bezug auf H·-Ion. Goebel berechnet aus kryoskopischen Daten, daß H_2SO_4 bezüglich der ersten Stufe etwa so stark wie HCl oder HNO_3 ist; bezüglich der zweiten Stufe ist sie bedeutend schwächer: $K_2 = 0{,}013$.

Die Beweglichkeit des SO_4''-Ions ist bei 25° gleich 78, die des HSO_4'-Ions wahrscheinlich praktisch damit identisch.

Die Neutralisationswärme beim Mischen von 1 Aequivalent 0,25-normaler H_2SO_4 mit 1NaOH ist 156900 cal; die Differenz gegen die Neutralisationswärme der HCl oder HNO_3 (13700 cal) rührt von der unvollständigen Dissoziation her. Die Wärmetönung des Vorgangs: $HSO_4' \rightarrow H^{\cdot} + SO_4''$ beträgt 5000 cal.

Die Ionisationswärme des SO_4''-Ions ist:

$$S + 4O + aq = SO_4'' + aq + 214500 \text{ cal.}$$

Bei der Elektrolyse von verdünnten H_2SO_4-Lösungen entsteht an der Anode O, an der Kathode H. Die Zersetzungsspannung 1,68 Volt entspricht der Entladung von H·- und OH'-Ionen. Zwei weitere Knickpunkte der Stromspannungskurve bei 1,9 und 2,6 Volt wurden von Nernst als Entladungspotentiale von SO_4'' und HSO_4' aufgefaßt, welche Deutung jedoch zweifelhaft ist. Bei hoher Stromdichte an der Anode treten neue Vorgänge auf, es wird Perschwefelsäure und Carosche Säure gebildet.

Das chemische Verhalten der H_2SO_4 hängt stark von der Konzentration ab. — Die wässerige Lösung ist sehr beständig und verändert sich auch im Licht nicht. Reine oder konzentrierte H_2SO_4 ist eins der stärksten wasserentziehenden Mittel; ferner wirkt sie kräftig oxydierend. Schon bei gewöhnlicher Temperatur wird konzentrierte H_2SO_4 langsam durch H_2 reduziert, rascher bei erhöhter Temperatur. P, S, Se, Te, C, ebenso die Metalle reduzieren beim Erwärmen. Die Reduktionsprodukte hängen von den Bedingungen ab, je nach den Umständen entsteht SO_2, S oder H_2S. Auf organische Stoffe wirkt konzentrierte H_2SO_4 sowohl wasserentziehend wie oxydierend ein und verursacht dadurch die Verkohlung und Zerstörung von Holz, Stroh u. dgl. und aller pflanzlichen und tierischen Gewebe.

Wegen ihrer Schwerflüchtigkeit verdrängt konzentrierte H_2SO_4 viele leichter flüchtige Säuren, auch die stärkeren HCl und HNO_3 aus ihren Salzen; sie selbst wird bei höherer Temperatur von den noch schwerer flüchtigen H_3PO_4, H_3BO_3, SiO_2 verdrängt.

In verdünnten Lösungen tritt die oxydierende und wasserentziehende Wirkung der H_2SO_4 in den Hintergrund, das chemische Verhalten ist das einer starken Säure; unedle Metalle lösen sich unter H_2-Entwickelung auf, Metalle von größerer Elektroaffinität als H_2 (z. B. Cu, Ag) nur, wenn die Konzentration des abgeschiedenen H_2 durch Depolarisation dauernd auf einem sehr kleinen Wert gehalten wird; in konzentrierten Lösungen kann H_2SO_4 selbst als Depolarisator dienen, indem sie durch den entstehenden H_2 zu H_2SO_3 reduziert wird.

Infolge der großen Elektroaffinität des SO_4''-Ions bildet H_2SO_4 besonders die normalen Salze vom Typus M_2SO_4, wo M ein Metalläquivalent bedeutet. Die neutralen Sulfate mit starkem Kation reagieren neutral, die mit schwachem, wie $Fe_2(SO_4)_3$ und $Al_2(SO_4)_3$, sauer. Mit der Stärke der Elektroaffinität des SO_4''-Ions hängt zusammen, daß die meisten neutralen Sulfate in H_2O leicht löslich sind. Schwer löslich ist $CaSO_4$, sehr schwer löslich $PbSO_4$, $SrSO_4$, $BaSO_4$; in sehr starken Säuren ist die Löslichkeit der genannten Salze erheblich größer als in H_2O. Viele Sulfate kristallisieren mit Kristallwasser; eine isomorphe Reihe mit $7H_2O$ bilden die Sulfate von Zn, Cd, Mg, Fe··, Co··, Ni··. — Die sauren Sulfate sind aus stark schwefelsauren Lösungen von Sulfaten durch Kristallisation zu erhalten. Sie besitzen meist die Formel $MHSO_4$, es sind aber auch schwefelsäurereichere bekannt, z. B. $MHSO_4.H_2SO_4$, $MHSO_4.2H_2SO_4$ und ähnliche.

Beim Erhitzen sind die Sulfate der Alkalien und Erdalkalien, des Pb und Mg bis zu sehr hohen Temperaturen beständig; aus den Sulfaten von Sb, Zn, Cu, Fe entweicht beim Glühen SO_3, bzw. ein Gemisch von SO_2, SO_3 und O. Beim Erhitzen der sauren Alkalisulfate entweicht ein Molekül H_2O und es bildet sich das Salz der Pyroschwefelsäure: $2NaHSO_4 = H_2O + Na_2S_2O_7$. Bei stärkerem Erhitzen geben die Pyrosulfate 1 Mol SO_3 ab und liefern neutrales Sulfat. In verdünnter wässeriger Lösung gehen die Pyrosulfate wieder in saure Sulfate bzw. deren Ionen über.

Die Sulfate zeigen große Tendenz, sich zu Doppelsalzen zu vereinigen. So geben u. a. die zweiwertigen Metalle Zn, Fe··, Mg, Ni··, Co··, Hg mit den Alkalien isomorphe Doppelsulfate vom Typus $K_2SO_4.FeSO_4.6H_2O$. Ein anderer wichtiger Typus sind die Alaune von der Formel: $R_2'SO_4.R_2'''(SO_4)_3 + 24H_2O$, oder auch, anders geschrieben: $R_2'R_2'''(SO_4)_4.12H_2O$ (R' = K, Na, NH_4 usw., R''' = Al···, Fe···, Cr···, V···). Die Doppelsulfate enthalten im allgemeinen keine sehr beständigen Komplexe, sondern sind in verdünnter wässeriger Lösung größten-

teils in die Einzelsalze und deren Ionen zerfallen. H_2SO_4 vermag jedoch auch stark komplexe Anionen zu liefern, z. B. mit $Cr^{\cdots}$, $Fe^{\cdots}$, $B(OH)_3$, V_2O_5; Näheres darüber siehe bei den betreffenden Elementen.

Analyse: 1. Qualitativer Nachweis: H_2SO_4 gibt mit löslichen Ba-Salzen einen weißen, in verdünnten Säuren unlöslichen Niederschlag; die Löslichkeit von $BaSO_4$ ist außerordentlich klein; sie beträgt 2,3 mg im Liter; in Säuren ist die Löslichkeit etwas größer, in konzentrierter H_2SO_4 lösen sich 10 bis 20%, wahrscheinlich durch Bildung von Hydrosulfat. Die gesättigten Lösungen der anderen schwerlöslichen Sulfate enthalten:

2,3 g $CaSO_4$
0,15 g $SrSO_4$
0,042 g $PbSO_4$.

Quantitative Bestimmung: 1. Gravimetrisch durch Fällen in saurer Lösung mit $BaCl_2$; der Niederschlag wird ausgewaschen, geglüht und als $BaSO_4$ gewogen.

2. Maßanalytisch kann H_2SO_4 bestimmt werden: 1. Jodometrisch; man fällt mit einer salzsauren Lösung von $BaCrO_4$, wodurch eine der H_2SO_4 äquivalente Menge CrO_3 in Freiheit gesetzt wird; bei Neutralisation mit NH_3 fällt das überschüssige $BaCrO_4$ aus und wird mit dem $BaSO_4$ abfiltriert. Im Filtrat wird die Chromsäure in bekannter Weise mit Jod und Thiosulfat titriert.

2. Mit Benzidin; Sulfate geben mit Benzidinchlorhydrat eine Fällung von Benzidinsulfat. Man gibt einen gemessenen Ueberschuß von Benzidinchlorhydrat zu, filtriert den Niederschlag ab und kann im Filtrat das übriggebliebene Benzidinchlorhydrat durch Titration der in ihm vorhandenen HCl mit NaOH bestimmen.

Halogenderivate der H_2SO_4:

Chlorschwefelsäure, $HClSO_3$. Chlorschwefelsäure leitet sich von H_2SO_4 ab durch Ersatz einer OH-Gruppe durch Cl; dieser Auffassung entspricht, daß $HClSO_3$ entsteht bei der Einwirkung von HCl auf H_2SO_4 bei Gegenwart von P_2O_5; es bildet sich ferner unter anderem durch Verseifung von SO_2Cl_2 mit einem Molekül H_2O. Farblose, an der Luft rauchende Flüssigkeit. d = 1,72. Kp. 158,4°. Im Dampfzustand dissoziiert in SO_3 + HCl. Durch H_2O wird $HClSO_3$ zerlegt in H_2SO_4 und HCl.

$HClSO_3$ enthält noch ein durch Metalle ersetzbares H-Atom und vermag daher Salze zu bilden; mit NaCl reagiert es und liefert unter Entweichen von HCl $NaClSO_3$. Mit H_2O gehen diese Salze in Sulfate über. — Die analoge Fluorverbindung $HFSO_3$ ist ebenfalls bekannt.

SO_2F_2 Sulfurylfluorid wird durch Vereinigung von SO_2 mit F erhalten. Farbloses, geruchloses Gas. Kp. = —52°, Fp. = —120°. Merkwürdigerweise ist das Gas gegen Wasser, mit dem es nach Analogie mit anderen Säurehalogeniden unter Bildung von H_2SO_4 und HF reagieren sollte, äußerst stabil; es wird von H_2O ohne chemische Veränderung, selbst bei 150°, absorbiert. Erst starke Alkalien bewirken Hydrolyse.

SO_2Cl_2, Sulfurylchlorid, wird erhalten beim Einleiten von Cl in eine Lösung von SO_2 in Kampfer, oder durch direkte Vereinigung von SO_2 und Cl bei starker Belichtung. Farblose, an der Luft rauchende Flüssigkeit. d = 1,69. Kp. = 70°. Die Bildungswärme aus den Elementen (S_I, O- und Cl-Gas) ist 89 800 cal.

Mit H_2O reagiert SO_2Cl_2 als echtes Säurechlorid und bildet in erster Stufe Chlorschwefelsäure, bei Ueberschuß von H_2O geht die Hydrolyse gleich weiter zu H_2SO_4. P, As und Sb entziehen dem Sulfurylchlorid das Cl und liefern SO_2. Mit NH_3 reagiert SO_2Cl_2 unter Bildung von Sulfamid $SO_2(NH_2)_2$.

$S_2O_5Cl_2$, Pyrosulfurylchlorid, entsteht z. B. bei der Reaktion von SO_3 mit NaCl nach: $4SO_3 + 2NaCl = S_2O_5Cl_2 + Na_2S_2O_7$ oder aus SO_3 mit SCl_4 nach: $5SO_3 + S_2Cl_2 = S_2O_5Cl_2 + 5SO_2$. Kp. = 143°; d = 1,87. Bildungswärme aus S_I, O- und Cl-Gas = 73 100 cal. Als Chlorid der Pyroschwefelsäure wird $S_2O_5Cl_2$ durch H_2O glatt zu HCl und H_2SO_4 hydrolysiert. Auch im übrigen verhält es sich ähnlich wie SO_2Cl_2. Man kennt auch eine Verbindung $S_2O_3Cl_4$.

S_2O_7, Ueberschwefelsäureanhydrid, wurde von Berthelot bei der Einwirkung stiller elektrischer Entladungen auf ein Gemisch von SO_2 und O entdeckt: $2SO_2 + 2O_2 = S_2O_7 + O$. Zähe farblose Flüssigkeit; Fp = 0°. Festes S_2O_7 kristallisiert in oft zentimeterlangen Nadeln. Besitzt schon bei 10° beträchtlichen Dampfdruck und sublimiert daher leicht. S_2O_7 ist ein zersetzlicher Körper, beim Erwärmen zerfällt es sofort in SO_3 und O; in der Nähe des Gefrierpunktes läßt es sich einige Tage aufbewahren. Durch Platinschwarz wird die Zersetzung katalysiert. Mit SO_2 reagiert es nach der Gleichung: $S_2O_7 + SO_2 = 3SO_3$. Beim Lösen von S_2O_7 in H_2O entsteht:

Perschwefelsäure $H_2S_2O_8$. Ihre gewöhnliche Darstellung besteht in der elektrolytischen Oxydation der H_2SO_4 oder ihrer Alkalisalze: $2SO_4'' + O + H_2O = S_2O_8'' + 2OH'$. Das zur Erzielung dieses Vorganges nötige Potential liegt sehr hoch, über dem der Entwickelung von freiem O entsprechenden. Daher ist die Bildung des Persulfations stets von O-Entwickelung begleitet. Günstig sind: Hohe Konzentration; aus freier H_2SO_4 entsteht $H_2S_2O_8$ in reichlicherer Ausbeute erst in ziemlich starken Lösungen; ferner niedrige Temperatur, weil in der

Wärme die größere Zerfallsgeschwindigkeit des S_2O_8'' die Ausbeute vermindert. Merkwürdigerweise erfolgt die Oxydation des SO_4'' zu S_2O_8'' in der Lösung der Sulfate von NH_4, K, Ni, Al mit viel besserer Ausbeute als in H_2SO_4. Stark erhöht wird die Ausbeute auch durch Zusatz von F'-Ionen. Stromverluste entstehen durch Reduktion des S_2O_8'' an der Kathode und bei Konzentrationen der H_2SO_4 über 60% durch Hydrolyse zu Caroscher Säure H_2SO_5; die letztere geht mit H_2O zum Teil in H_2SO_4 und H_2O_2 über, welches letztere an der Anode H_2O bildet.

Lösungen von $H_2S_2O_8$ und der Persulfate sind farblos. Die Bildungswärme ist nach Berthelot:

$$S_2 + 7O + aq = H_2S_2O_8aq + 24\,700 \text{ cal.}$$

Die Bildung aus $2H_2SO_4$ und O ist endothermisch und erfordert 34 800 cal.

$H_2S_2O_8$ zeigt in ihrem chemischen Verhalten nahe Beziehung zu H_2O_2 und hat daher wahrscheinlich die Konstitution:

$$\begin{array}{l} \quad\quad\;\; \diagup OH \\ O{-}SO_2 \\ | \\ O{-}SO_2 \\ \quad\quad\;\; \diagdown OH \end{array}$$

welche sie als ein Wasserstoffsuperoxyd erscheinen läßt, dessen beide H-Atome durch den HSO_3-Rest ersetzt sind.

Das S_2O_8''-Ion zeigt große Tendenz, wieder in SO_4''-Ion überzugehen. Infolge davon sind $H_2S_2O_8$ und ihre Salze kräftige Oxydationsmittel. Cl' und Br' werden durch $H_2S_2O_8$ ihrer Ladungen beraubt und als Gase abgeschieden, $Fe^{\cdot\cdot}$, $Cr^{\cdot\cdot\cdot}$ zu $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$ und CrO_4'' oxydiert. Aus J'-Lösungen wird langsam J abgeschieden. Dagegen vermag $H_2S_2O_8$ zum Unterschied von H_2O_2 weder $KMnO_4$ zu entfärben, noch aus CrO_3 Ueberchromsäure zu erzeugen. Organische Farbstoffe werden gebleicht, Indigolösung entfärbt, substituierte Phenole in Dioxybenzole verwandelt usw. Die Persulfate der Alkalien werden technisch hergestellt und finden ihrer Oxydationswirkungen wegen mannigfache Anwendung. Die Persulfate der alkalischen Erden sind löslich in H_2O (Unterschied von H_2SO_4). Die Persulfate der schweren Metalle lassen sich durch doppelte Umsetzung gewinnen.

Analyse: Qualitativer Nachweis: Mit Strychninnitrat fällt das schwerlösliche Strychninpersulfat aus. Mit Guajacktinktur tritt Blaufärbung ein. Unterschied von H_2O_2 s. oben.

Quantitative Bestimmung. Gravimetrisch: 1. Nach Reduktion mit SO_2 fällt man mit $BaCl_2$ und bringt das gefällte $BaSO_4$ zur Wägung. 2. Man fällt mit Strychninnitrat, läßt 24 Stunden stehen und trocknet den mit möglichst wenig H_2O ausgewaschenen Niederschlag bei 100° bis zur Gewichtskonstanz.

Maßanalytisch: Man kocht die Persulfatlösung 20 Minuten lang und titriert die nach der Gleichung $K_2S_2O_8 + H_2O = K_2SO_4 + H_2SO_4 + O$ gebildete H_2SO_4 mit NaOH; oder man erwärmt mit überschüssiger KJ und titriert das ausgeschiedene J mit Thiosulfat; oder man versetzt mit überschüssigem $FeSO_4$ und titriert den Ueberschuß mit $KMnO_4$ zurück.

H_2SO_5, Carosche Säure, Monosulfopersäure. Entsteht bei Einwirkung von starker H_2SO_4 auf Persulfate oder $H_2S_2O_8$ und durch Versetzen von kalter konz. H_2SO_4 mit H_2O_2. Als chemisches Individuum wurde sie von Caro erkannt, ausführlich untersucht besonders von Baeyer und Villiger. Diese Forscher leiteten aus dem Verhältnis ihres Oxydationswertes zu der Menge des aus ihr zu erhaltenden SO_3 die Formel H_2SO_5 ab und fassen sie auf als Produkt der Hydrolyse von $H_2S_2O_8$:

$$\begin{array}{l} O{-}SO_3H + HOH \\ | \\ O{-}SO_3H \end{array} = H_2SO_4 + \begin{array}{l} OH \\ | \\ O{-}SO_3H \end{array}$$

wonach sie als einbasische Säure erscheint. Die Lösung von Monosulfopersäure wird leicht weiter hydrolysiert; die zweite Stufe führt zu H_2O_2:

$$\begin{array}{l} OH \\ | \\ O{-}SO_3H + HOH \end{array} \rightleftarrows H_2SO_4 + H_2O_2.$$

Die Hydrolyse geht langsam in verdünnter, rasch in starker H_2SO_4-Lösung vor sich; sie führt zu einem Gleichgewicht, da, wie erwähnt, aus H_2O_2 und H_2SO_4 sich Carosche Säure bildet. In ihren oxydierenden Eigenschaften unterscheidet sich H_2SO_5 von $H_2S_2O_8$ dadurch, daß sie aus J'-Ionenlösungen sofort Jod abscheidet, während $H_2S_2O_8$ dies nur langsam, Mischungen von H_2SO_4 mit H_2O_2 (in frischem Zustande) gar nicht tun. Die beim Zusatz von konzentrierter H_2SO_4 zu Persulfaten gebildete Flüssigkeit riecht ähnlich wie Chlorkalk und zeigt außerordentlich stark oxydierende Wirkungen; sie vermag z. B. Amine direkt zu Nitroso- und Nitroverbindungen zu oxydieren. Von H_2O_2 ist Carosche Säure durch das Ausbleiben der Reaktionen mit $KMnO_4$ und TiO_2 zu unterscheiden.

Thioschwefelsäure, $H_2S_2O_3$. 1799 wurde Natriumthiosulfat von Chaussier bei der Darstellung von Soda durch Glühen von Na_2SO_4 mit Kohle entdeckt. Von Gay-Lussac stammt der früher gebräuchliche Name „unterschweflige Säure“.

Thiosulfate werden auf verschiedene Weise

gewonnen: 1. Aus S durch Schmelzen mit Alkali oder Kochen mit Alkalilösung: $6NaOH + 4S = 3H_2O + Na_2S_2O_3 + 2Na_2S$. 2. Aus $Na_2S + Na_2SO_3$ in wässeriger Lösung mit J nach der Gleichung: $Na_2S + Na_2SO_3 + 2J = Na_2S_2O_3 + 2NaJ$ oder als Ionengleichung geschrieben:

$$S'' + SO''_3 + 2J = S_2O_3'' + 2J'.$$

3. Aus Polysulfiden durch Oxydation:

$$K_2S_5 + 3O = K_2S_2O_3 + 3S$$

4. Aus Sulfiten durch Addition von S beim Kochen der wässerigen Lösung mit S: $K_2SO_3 + S = K_2S_2O_3$. — Außerdem bilden sich Thiosulfate noch nach verschiedenen anderen, weniger wichtigen Reaktionen.

Als Konstitution der Thioschwefelsäure wird $SO_2\begin{cases} SH \\ OH \end{cases}$ angenommen, welche Formel sie als Schwefelsäure erscheinen läßt, in der eine OH-Gruppe durch die SH-Gruppe ersetzt ist.

In freier Form ist $H_2S_2O_3$ äußerst unbeständig und nur in sehr verdünnter Lösung für kurze Zeit zu erhalten. Sie zerfällt schnell in H_2SO_3 und S, der sich in amorpher Form abscheidet. In verdünnten Thiosulfatlösungen tritt die S-Abscheidung beim Ansäuern nicht sofort ein, indem sich zuerst eine an S übersättigte Lösung zu bilden scheint. Daß der Zerfall sofort nach Zusetzen der Säure beginnt, erkennt man, wenn man neutralisiert, bevor der S auftritt; es fällt dann trotzdem S aus. In alkoholischer Lösung scheint die Säure etwas beständiger zu sein. Infolge der Unbeständigkeit der freien Säure läßt sich über ihre physikalischen Eigenschaften wenig aussagen. Lösungen der $H_2S_2O_3$ zeigen sofort nach der Herstellung einen eigentümlich herben, zusammenziehenden Geschmack.

Ueber ihre Leitfähigkeit liegt eine Messung von **Holleman** vor, welcher bei 25° fand:

v	λ	α
$^1/_{32}$	292	0,667
$^1/_{\infty}$	(438)	

Das Resultat zeigt jedenfalls, daß $H_2S_2O_3$ eine starke Säure, etwa wie H_2SO_4, ist. Die Wanderungsgeschwindigkeit des Thiosulfations bei 25° ist 85.

Die Bildungswärme wird von **Berthelot** und **Thomson** ziemlich verschieden angegeben.

$$2S + 2O + aq = H_2S_2O_3 + \begin{cases} 69\,500\ (\text{Thomson}), \\ 79\,400\ (\text{Berthelot}). \end{cases}$$

Die Salze sind ziemlich beständig; sie enthalten fast immer Kristallwasser. Die Alkalithiosulfate sind in H_2O leicht löslich, die übrigen schwer löslich. Saure Salze sind nicht bekannt.

Das Thiosulfation ist leicht oxydierbar. Bei elektrolytischer Oxydation entsteht anodisch Tetrathionat: $2S_2O_3'' + O + H_2O = S_4O_6'' + 2OH'$, da diesem Vorgang das niedrigste Potential entspricht. Das Anodenpotential liegt je nach Konzentration und Stromdichte bei + 0,75 bis 0,95 Volt (gegen die Wasserstoffnormalelektrode). Das Tetrathionation ist gegen weitere Oxydation recht beständig. Um glatte S_4O_6''-Bildung zu erzielen, muß man auf Neutralität der Lösung achten. Denn in alkalischer Lösung unterliegt S_4O_6'' einer hydrolytischen Spaltung zu S_3O_6'':

$$4S_4O_6'' + 6OH' \rightarrow 5S_2O_3'' + 2S_3O_6'' + 3H_2O.$$

Das entstehende Trithionat wird leicht zu Sulfat oxydiert. In schwach saurer Lösung zerfällt S_2O_3''-Ion:

$$S_2O_3'' + H^{\cdot} = HSO_3' + S$$

und gibt Bisulfit, welches beim herrschenden Anodenpotential zu Sulfat oxydiert wird: $HSO_3' + O = SO_4'' + H^{\cdot}$; die Lösung wird dadurch stärker sauer, so daß also die Sulfatbildung in saurer Lösung sich selbst begünstigt. Chemisch wird S_2O_3'' durch Stoffe, deren Oxydationspotential nicht zu hoch liegt, ebenfalls zu S_4O_6'' oxydiert, z. B. durch $Fe^{\cdots}$ und J. Die letztere Reaktion: $2S_2O_3'' + 2J = 2J + S_4O_6''$ bildet die Grundlage eines wichtigen maßanalytischen Verfahrens (Jodometrie). H_2O_2 oxydiert in dauernd neutral gehaltener Lösung zu Tetrathionat, sonst zu Sulfat und Trithionat. Cl, Br, HNO_3, CrO_3, $KMnO_4$ geben Sulfat. Metalle, welche sehr schwer lösliche Sulfide bilden, entziehen der Thioschwefelsäure den S der SH-Gruppe. $Ag_2S_2O_3$ und HgS_2O_3, weiße Niederschläge, werden beim Kochen schwarz durch Bildung von Ag_2S und HgS.

Thioschwefelsäure besitzt große Neigung zur Bildung komplexer Salze; die meisten unlöslichen Thiosulfate lösen sich in überschüssigem Alkalithiosulfat unter Bildung von zum Teil sehr beständigen komplexen Anionen auf.

Bei stärkerem Erhitzen unter Luftabschluß zersetzen die Thiosulfate sich in Thiosulfat und Polysulfid.

$Na_2S_2O_3$, sogenanntes „unterschwefligsaures Natron" wird technisch in größeren Mengen hergestellt und dient unter anderem als Fixiermittel in der Photographie, als Antichlor in Bleichereien und bei der Papierfabrikation.

Analyse: Qualitativer Nachweis: Thiosulfate geben beim Ansäuern Geruch nach SO_2 und Fällung von S. Mit $BaCl_2$ geben Thiosulfate in nicht zu verdünnten Lösungen weißes BaS_2O_3, löslich in 400 Teilen H_2O, mit $AgNO_3$ weißes, beim Kochen schwarz

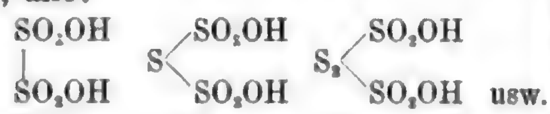
werdendes $Ag_2S_2O_3$. Saure $KMnO_4$-Lösung und Jod werden entfärbt. Mit $ZnSO_4$ und Nitroprussidnatrium tritt keine Rosafärbung auf (Unterschied von H_2SO_3).

Quantitative Bestimmung:

Gravimetrisch: Nach Oxydation zu H_2SO_4 als $BaSO_4$.

Maßanalytisch: Man läßt die Thiosulfatlösung in einen gemessenen Ueberschuß angesäuerter Jodlösung fließen und titriert den Ueberschuß mit Thiosulfat zurück.

Polythionsäuren. Die Polythionsäuren bilden eine Gruppe von Säuren des S, die eine Anzahl gemeinsame Züge aufweisen. Ihre allgemeine Formel ist $H_2S_nO_6$, wo n eine ganze Zahl von 2 bis 6 sein kann. Sie sind zweibasisch. Was ihre Konstitution betrifft, so nimmt man in ihnen meist nach dem Vorgang von Blomstrand und Mendelejeff zwei Sulfogruppen an, die in der Dithionsäure direkt, in den andern unter Zwischenschaltung von S-Atomen verbunden sind, also:



Dithionsäure Trithionsäure Tetrathionsäure

Ein Gemisch aller Polythionsäuren mit Ausnahme der Dithionsäure wird erhalten beim alternierenden Einleiten von SO_2 und H_2S in Wasser. Der Endzustand der Reaktion zwischen SO_2 und H_2S ist durch die Gleichung gegeben: $2H_2S + SO_2 = 3S + 2H_2O$; es scheidet sich S ab, zum Teil in kolloidaler Form. Daneben bilden sich durch komplizierten Reaktionsverlauf die Polythionsäuren, besonders Tetra- und Pentathionsäure. In dem Reaktionsprodukt fand Wackenroder die Pentathionsäure, und nach ihm heißt die durch Einleiten von SO_2 in H_2S erhaltene Flüssigkeit „Wackenrodersche Flüssigkeit". Eingehend untersucht wurde dieselbe von Debus. Die Wackenrodersche Flüssigkeit läßt sich unter Abscheidung des kolloidal gelösten S bis zur Dichte 1,6 eindampfen und bildet dann eine farblose, ölartige, stark saure Flüssigkeit, die sich nur langsam unter S-Abscheidung und Entwickelung von SO_2 zersetzt. Alle Pentathionsäuren sind nur in wässeriger Lösung bekannt. Ihre Bildungswärmen (aus S_I, O-Gas und H_2O) sind nach Thomson:

$H_2S_2O_6$	aq	211 080 cal
$H_2S_3O_6$	„	201 760 „
$H_2S_4O_6$	„	192 430 „
$H_2S_5O_6$	„	183 110 „

Die Zahlen zeigen für Eintritt jedes S-Atoms eine konstante Abnahme von 9320 cal.

Die Molekularrefraktion wächst für Eintritt jedes S-Atoms um 14 bis 15 (nach der n-Formel) und 8,3 bis 9 (nach der n^2-Formel), d. h. um den für zweiwertigen S gültigen Wert.

Die Polythionsäuren sind sehr starke Säuren. $H_2S_2O_6$ und $H_2S_4O_6$, für die Messungen der Leitfähigkeit vorliegen, sind stärker dissoziiert als H_2SO_4 in gleicher Konzentration (25°; η = Aequivalente/Liter, λ = Aequivalentleitfähigkeit, $\alpha = \lambda/\lambda_\infty$):

$H_2S_2O_6$ η	λ	α	$H_2S_2O_6$ η	λ	α
$1/4$	363	0,814	$1/4$	365	0,859
$1/16$	387	0,868	$1/16$	387	911
$1/64$	403	0,904	$1/64$	404	951
$1/256$	411	0,922	$1/256$	415	977
$1/\infty$	466	(1,000)	$1/\infty$	425	(1,00)

Die Beweglichkeit ist (bei 25°) für

S_2O_6	81,4
S_3O_6	77
S_4O_6	72
S_5O_6	65

Dithionsäure, $H_2S_2O_6$. Die Dithionsäure wurde zuerst von Walter und Gay-Lussac dargestellt. Man erhält das Dithionation durch gelinde Oxydation des SO_3''-Ions, z. B. bei der Elektrolyse von Sulfiten. Das nötige Anodenpotential liegt über dem der Oxydation zu Sulfat — daher ist die Dithionatbildung stets von Sulfatbildung begleitet — aber noch unterhalb des Potentials der Sauerstoffentwickelung. Von Oxydationsmitteln bilden MnO_2, $Fe^{\cdots}$-, $Mn^{\cdots}$-, $Co^{\cdots}$-Ionen mit H_2SO_3 Dithionsäure. Man stellt die freie Säure dar durch Einleiten von SO_2 in H_2O, welches $Fe(OH)_3$ oder MnO_2 aufgeschlämmt enthält. Man fällt darauf durch $Ba(OH)_2$ gebildetes SO_4''. Im Filtrat fällt man überschüssiges $Ba(OH)_2$ durch Einleiten von CO_2 und gewinnt aus der Lösung BaS_2O_6 durch Kristallisation. Aus der Lösung dieses Salzes erhält man $H_2S_2O_6$ durch Versetzen mit der berechneten Menge H_2SO_4.

Die wässerige Lösung läßt sich bis zur Dichte 1,35 konzentrieren, beim Erwärmen oder noch stärkerer Konzentration zerfällt die Säure: $H_2S_2O_6 = H_2SO_4 + SO_2$. Durch Oxydationsmittel wird die Säure und ihre Salze ziemlich schwer angegriffen. In der Kälte wirken nicht ein: HNO_3, Chlorwasser, HClO, $Mn^{\cdots}$, $HMnO_4$, PbO_2. Bei kräftiger Oxydation entsteht H_2SO_4. Reduktionsmittel bilden aus dem S_2O_6''-Ion SO_3''-Ion zurück.

Es sind nur neutrale und basische, keine sauren Dithionate bekannt. Berzelius und Kolbe hielten die Säure daher für einbasisch und erteilten ihr die Formel HSO_3. Ueber die Gründe, die zur Annahme der verdoppelten Formel führen, s. z. B. J. Meyer, Habilitationsschrift, Breslau.

Alle Dithionate sind in H_2O leicht löslich. Die Alkali- und Erdalkalidithionate sind trocken und in Lösung ziemlich beständig.

Die übrigen zersetzen sich leicht beim Erwärmen.

Trithionsäure, $H_2S_3O_6$. Die Trithionsäure bildet sich beim Erhitzen von $KHSO_3$ mit S, aus den höheren Polythionsäuren durch Einleiten von SO_2 und durch freiwillige Zersetzung; findet sich daher in der Wackenroderschen Flüssigkeit. Ferner entsteht sie aus Thiosulfaten mit SO_2 neben Tetra- und Pentathionsäuren, beim Verseifen von N_3S_4 mit H_2O, aus S_2Cl_2 mit Sulfiten:

$$S_2Cl_2 + 2KSO_3 = K_2S_3O_6 + 2KCl + S.$$

Die wässerige Lösung der freien Säure wird erhalten durch Zersetzung des Kaliumsalzes mit H_2SiF_6 oder $HClO_4$; sie ist eine farb- und geruchlose, wenig beständige Flüssigkeit. Sie zerfällt nach: $H_2S_3O_4 = H_2SO_4 + SO_2 + S$.

Oxydationsmittel geben leicht H_2SO_4; H_2S wirkt im Gegensatz zu $H_2S_4O_6$ nicht ein.

Mit $CuSO_4$ entsteht in der Wärme ein Niederschlag von CuS, mit $HgNO_3$ von HgS. $AgNO_3$ erzeugt eine weiße Fällung, die allmählich durch Uebergang in Ag_2S schwarz wird.

$H_2S_3O_6$ bildet nur neutrale Salze, welche in H_2O leicht löslich sind, ausgenommen das $Hg^{\cdot\cdot}$, $Hg^{\cdot}$ und $Ag^{\cdot}$-Salz. Beim Erhitzen zersetzen sie sich in Sulfat, SO_2 und S. In Lösung sind sie ebenso unbeständig wie die freie Säure. Trithionate werden durch H_2S in Sulfat, Thiosulfat und S verwandelt; durch K_2S in Thiosulfat nach der Gleichung:

$$K_2S_3O_6 + K_2S = 2K_2S_2O_3.$$

Durch Alkali werden sie hydrolysiert:

$$2K_2S_3O_6 + 6KOH = K_2S_2O_3 + 4K_2SO_3 + 3H_2O.$$

Tetrathionsäure, $H_2S_4O_6$. Tetrathionsäure wurde 1842 von Fordos und Gélis bei der Reaktion von J mit $Na_2S_2O_3$ entdeckt. Bildung: 1. in der Wackenroderschen Flüssigkeit; 2. durch elektrolytische Oxydation von $Na_2S_2O_3$ bei einem Anodenpotential von + 0,75 bis + 0,95 Volt (gegen die Wasserstoffnormalelektrode), oder durch Oxydation mit J, $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$ u. dgl.; 3. aus $H_2S_5O_6$ durch freiwillige Zersetzung; aus $H_2S_3O_6$ durch Addition von S.

Die freie Säure wird in Lösung erhalten durch Zersetzen des Kaliumsalzes mit Weinsäure. In verdünnter Lösung ist $H_2S_4O_6$ ziemlich beständig, in konzentrierter zerfällt sie beim Kochen in S, SO_2 und H_2SO_4. Durch HNO_3, Cl usw. wird $H_2S_4O_6$ zu H_2SO_4 oxydiert, durch SO_2 wird ihr S entzogen und $H_2S_3O_6$ gebildet. H_2S reagiert nach: $H_2S_4O_6 + 5H_2S = 6H_2O + 9S$; ein Teil des freiwerdenden S tritt mit weiterer $H_2S_4O_6$ zu $H_2S_5O_6$ zusammen. Die Tetrathionate sind in H_2O leicht löslich; durch Fällen mit Alkohol lassen sie sich kristallisiert erhalten. In Lösung zersetzen sie sich langsam; es entsteht ein Gemisch von Tri- und Penthathionat, Sulfat und SO_2. Oxydationsmittel führen die Salze in Sulfat über, Reduktionsmittel z. B. H_2 geben glatt Thiosulfat. Durch Alkalien werden die Tetrathionate hydrolysiert etwa nach:

$$4S_4O_6'' + 6OH' = 5S_2O_3'' + 2S_3O_6'' + 3H_2O.$$

Von den Trithionaten unterscheiden sich die Tetrathionate dadurch, daß sie beim Kochen mit $CuSO_4$ kein CuS liefern.

Pentathionsäure, $H_2S_5O_6$. Die Existenz dieser Säure ist früher öfter bestritten worden; durch die Darstellung kristallisierter, analysenreiner Salze durch Debus wurde die Frage entschieden. Bildung: In der Wackenroderschen Flüssigkeit; auch durch einige andere Reaktionen wird $H_2S_5O_6$ erhalten.

$H_2S_5O_6$ ist wenig beständig; mit H_2S scheidet sie S ab: $H_2S_5O_6 + 5H_2S = 6H_2O + 10S$. Durch SO_2 wird sie teilweise in $H_2S_3O_6$ und $H_2S_4O_6$ verwandelt.

Die Pentathionate sind in H_2O leicht löslich, sehr zersetzlich und gehen unter S-Abscheidung in Tetrathionate, und weiterhin in Trithionate über. In alkalischer Lösung tritt sofort Zerfall in S und Tetrathionat ein. Oxydationsmittel liefern Sulfat, Reduktionsmittel zunächst Tetrathionat, dann Thiosulfat, schließlich Sulfid. Ammoniakalische $AgNO_3$-Lösung färbt zuerst braun, dann scheidet sich Ag_2S aus, die entsprechende Reaktion findet mit $Hg(CN)_2$ statt.

Hexathionsäure, $H_2S_6O_6$. Das Kaliumsalz dieser Säure ist von Debus aus der Wackenroderschen Flüssigkeit dargestellt worden.

9. Photochemie. S zeigt ein Banden- und ein Linienspektrum. Das Bandenspektrum entsteht in Vakuumröhren unter dem Einfluß der Entladungen des Funkeninduktors, wenn keine Leidener Flaschen eingeschaltet werden, oder durch Verdampfen von S oder von S-Verbindungen in der Wasserstofflamme. Besonders intensiv sind in dem in der Wasserstofflamme erzeugten Spektrum Strahlen der Wellenlänge 396, 404, 408,5, 427, 431,5, 444,5, 457,5, 471, 498. Die Flamme ist blau gefärbt. Ein charakteristisches Linienspektrum wird bei Einschaltung von Leidener Flaschen im Vakuumrohr und in der Funkenstrecke bei gewöhnlichem Druck erhalten.

Ein Absorptionsspektrum in überhitztem S-Dampf haben Gernez und Salet beschrieben.

Die wichtigeren photochemischen Reaktionen des S und seiner Verbindung wurden in den vorhergehenden Abschnitten erwähnt.

10. Kolloidchemie. Die durch Zersetzung von SO_2 mit H_2S erhaltene Wackenrodersche Flüssigkeit enthält den S zum Teil in Form feiner Tröpfchen, zum Teil in kolloidaler Lösung. Debus erklärte den S der Wackenroderschen Flüssigkeit für eine neue Modifi-

kation und nannte ihn δ-Schwefel. — Nach diesem Verfahren lassen sich keine klaren Lösungen von kolloidalem S herstellen, dieselben sind vielmehr stets milchig getrübt. Ein Verfahren, welches klare Lösungen liefert, ist von Raffo beschrieben worden. Man läßt eine konzentrierte $Na_2S_2O_3$-Lösung in kalt gehaltene H_2SO_4 vom spezifischen Gewicht 1,84 tröpfeln. Man erhält so eine trübe gelblichweiße Flüssigkeit, welche sich beim Erwärmen zu einer hellgelben Lösung klärt. Man filtriert durch Glaswolle und zentrifugiert den beim Erkalten ausgeschiedenen S ab. Derselbe löst sich wieder in H_2O und wird durch Na_2CO_3 zur weiteren Reinigung gefällt. Der gefällte S löst sich vollständig in H_2O zu einer klaren kolloidalen Lösung mit 4,5 % S und 1,5 % Na_2SO_4. Die Lösungen sind am beständigsten bei einem bestimmten Gehalt an Elektrolyt. Bei fortgesetzter Reinigung durch Dialyse zeigt sich, daß in dem Maße, wie die Elektrolyte entfernt werden, der Schwefel ausfällt. Aber auch durch erhöhte Elektrolytkonzentration wird er ausgefällt; nur existiert für die kolloidalen S-Lösungen, im Gegensatz zu anderen kolloidalen Lösungen, kein Schwellenwert, oberhalb dessen der S quantitativ ausfällt, sondern die Löslichkeit ist eine stetige Funktion der Elektrolytkonzentration. In heißem H_2O ist die Löslichkeit größer als in kaltem. Die kolloidalen S-Lösungen sind sehr homogen; sie bestehen zum größeren Teil aus Amikronen; die Teilchen sind negativ geladen. Bei längerem Stehen kristallisiert S_I aus ihnen aus. Der gefällte, wieder in H_2O lösliche S ist etwas plastisch und enthält stets erhebliche Mengen H_2O und Salze, von denen er sich nicht befreien läßt, ohne gleichzeitig seine Löslichkeit einzubüßen.

The Svedberg hat Isobutylalkosole des S durch Zerstäuben von S in der Funkenstrecke erhalten. Auch Glycerinosole, welche je nach der Teilchengröße violettblau, grün, gelbbraun bis rotbraun gefärbt sind, sind bekannt; am unbeständigsten sind die violettblauen (Wolfg. Ostwald). Kolloidale Lösungen von S_μ in CS_2 werden erhalten, wenn man abgeschreckten S, solange er noch plastisch ist, mit CS_2 extrahiert; zugleich mit dem S_λ geht dann stets auch etwas S_μ in kolloidaler Form in Lösung. Nach Wigand wird eine kolloidale Lösung von S_μ in CS_2 auch erhalten im ersten Moment beim Bestrahlen von Lösungen von S_λ.

Literatur. *Br. Linne, Schwefel. In Gmelin-Kraut-Friedheims Handbuch der anorganischen Chemie, I, 1. Heidelberg 1907.* — *V. Auger, Soufre. In Moissans Traité de chimie minérale. Paris 1904.*

H. Braune.

c) Selen.

Se. Atomgewicht 79,2.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Elementares Selen, Formarten und physikalische Konstanten; kolloidales Selen. 6. Valenz, Ionen. 7. Spezielle Chemie. 8. Analytische Chemie. 9. Photochemie, Selenzellen. 10. Spektralchemie. 11. Verwendung.

1. Atomgewicht. Das Atomgewicht, von den meisten Autoren aus dem Verhältnis Silberselenit zu Silber oder aus der Synthese des Selen-4-chlorids ermittelt, ist von der internationalen Kommission für das Jahr 1912 zu 79,2 festgesetzt worden.

2. Vorkommen. Selen gehört zu den selteneren Elementen, ist aber gleichwohl auf der Erde ziemlich verbreitet. In freiem Zustande soll es sich zusammen mit Schwefel auf der Insel Volcano vorfinden. Sonst findet es sich meist an Metalle gebunden, z. B. als Eukairit (Selen-Kupfer-Silber, Chile) und als Zorgit (Selen-Kupfer-Blei, Argentinien). Indessen sind diese eigentlichen Selenmineralien nicht häufig. Meistens kommt das Se als Verunreinigung von Kiesen vor, in Rio Tinto (Spanien), Falun (Schweden) und in Deutschland im Rammelsberger Kupferkies und im Mansfeldischen Kupferschiefer. Beim Abrösten dieser Kiese wird es von den Röstgasen mitgeführt, und setzt sich teils in den Flugstaubkanälen ab, teils gelangt es in die Bleikammern der Schwefelsäurefabriken. Der Kammerschlamm enthält mitunter 2 bis 3 % Se.

3. Geschichte. Berzelius untersuchte 1817 den Kammerschlamm einer mit Faluner Schwefel arbeitenden Schwefelsäurefabrik, in dem er, einigen charakteristischen Reaktionen zufolge, Tellur vermutete. Indessen überzeugte er sich bald, daß die Reaktionen, welche das Tellur vorgetäuscht hatten, einem neuen Grundstoff zukamen, welchen er, um die Aehnlichkeit mit dem Tellur anzudeuten, Selen nannte (σελήνη = Mond, tellus = Erde).

4. Darstellung. Zur Darstellung des Se dienen entweder Selenmineralien oder die selenhaltigen Abfallprodukte der Schwefelsäurefabrikation. — Zorgit, aus dem zur Zeit viel Se dargestellt wird — sein Se-Gehalt beträgt bis 31 % —, wird mit Königswasser zersetzt. Auf Zusatz von viel Wasser scheidet sich das Blei als Chlorid ab, und aus der Lösung wird dann das Se mit Schwefeldioxyd niedergeschlagen. — Aus Bleikammerschlamm extrahiert man das Se mit starker Cyankalilösung; sie nimmt das Se als Selencyankalium KCNSe auf. Durch Ansäuern setzt man die Selencyanwasserstoffsäure in Freiheit; sie zerfällt in Blausäure und Se, welches sich in roten Flocken absetzt. Es wird

geschmolzen und kommt in kleine Platten gegossen in den Handel. — Durch Auflösen dieses Handelsselens in Salpetersäure, Reduktion mit Schwefeldioxyd und Sublimation des gefällten Se im Kohlendioxydstrom kann man das Produkt weiter reinigen.

5. **Formarten.** Se tritt, wie Schwefel, in verschiedenen Formarten auf. Eine Uebereinstimmung der Modifikationen beider Elemente ist nicht deutlich. — Kühlt man geschmolzenes Se rasch ab, so erhält man die gewöhnliche, glasige Form, das Se_α, welches als unterkühlte Flüssigkeit aufzufassen ist. Es ist völlig amorph, bei Zimmertemperatur spröde und pulverisierbar, dunkelfarbig, in dünnen Splittern rot durchscheinend, ein Nichtleiter der Elektrizität. Fein pulverisiert ist es ein rotes Pulver, identisch mit dem aus Lösungen von seleniger Säure durch Reduktionsmittel ausgefällten flockigen Se. In Schwefelkohlenstoff löst es sich schwer, aber vollkommen auf. Aus dieser Lösung kristallisiert das rote Se_β, welches in zwei verschiedenen monoklinen Kristallformen auftritt und in Schwefelkohlenstoff noch schwerer löslich ist wie das vorige. Auch Se_β leitet die Elektrizität nicht. Beim Erhitzen gehen Se_α und Se_β in das graue, kristallinische, metallische Se_γ über, unlöslich in Schwefelkohlenstoff. Dieses metallische Se existiert nach neueren Untersuchungen in zwei Formen, Se_A und Se_B, die sich durch Aussehen, spezifisches Gewicht und Leitvermögen für Elektrizität unterscheiden. Beim Erwärmen des unterkühlten Se_α auf 80 bis 130°, entsteht unter Wärmeabgabe vorwiegend Se_A. Es ist metallisch grau, mit rötlichem Schimmer, rotem Strich, spröde und pulverisierbar. In völlig reinem Zustande, frei von Selendioxyd, hat es kein elektrisches Leitvermögen. Se_B dagegen ist blaugrau, duktil, hämmerbar; es entsteht aus Se_A unter Volumabnahme, mit merklicher Geschwindigkeit bei Temperaturen oberhalb 160° und leitet die Elektrizität. Bei jeder Temperatur besteht ein Gleichgewicht zwischen beiden Formen, welches sich durch Erhöhung zugunsten von Se_B, durch Erniedrigung zugunsten von Se_A verschiebt, sich aber nur äußerst langsam einstellt. Die Einstellung kann durch Katalysatoren, z. B. Silber, beschleunigt werden. Durch rasches Abkühlen von 200° auf Zimmertemperatur kann Se_B in unterkühltem Zustande erhalten werden; seine Leitfähigkeit ist dann 3- bis 5-mal so groß als bei 200°, es hat also einen negativen Temperaturkoeffizienten. Allmählich, in dem Maße wie sich Se_B in Se_A zurückverwandelt, nimmt die Leitfähigkeit ab. — Es ist unentschieden, ob es sich um Isomerie oder Polymerie handelt. Die Verhältnisse liegen offenbar ähnlich wie beim S_μ und S_λ, nur spielen sich die Umwandlungen bei Se in der festen Phase ab (s. auch unter 9). Die Umwandlung $Se_\alpha \rightarrow Se_\beta \rightarrow Se_\gamma$ ist von Energieabnahme begleitet.

Physikalische Konstanten. Schmelzpunkt: Se_α: erweicht bei 60°; Se_β: 170 bis 180°; Se_γ: 217°. Siedepunkt: 688° bei 760 mm; ca. 310° im Kathodenlichtvakuum. Spezifisches Gewicht: Se_α 4,27; Se_β 4,47; Se_γ, bei ca. 200° kristallisiert, (Se_B), 4,8. bei ca. 130° kristallisiert, (Se_A), ca. 4,6. Spezifische Wärme: Se_α, von —19° bis +87° = 0,1031, von —27° bis +8° = 0,0746; Se_γ, von 25°—60° = 0,084.

Se-Dampf ist gelb, heller wie Schwefeldampf. Zwischen 900° und 1800° entspricht seine Dichte der Molekulargröße Se_2.

Die Molekulargröße des gelösten Se ist sehr verschieden gefunden worden, von S_8 (in Phosphor) bis gegen Se_1 (sehr verdünnte Lösung in Schwefelchlorür).

Kolloidales Selen. Kolloidales Se läßt sich durch Dispersions- und Reduktionsmethoden erhalten. Durch kathodische Beladung von Se, welches man aus praktischen Gründen auf ein Platinblech aufschmilzt, erhält man bereits bei geringen Spannungen gelbrote wässerige Lösungen. — Durch Reduktion von 0,2-prozentiger seleniger Säure mit 0,5 ‰ Hydrazinhydrat lassen sich unbegrenzt haltbare Sole gewinnen. Durch Säuren oder durch Kolloide mit positiver Ladung wird das Se aus diesen Lösungen ausgefällt. — Auf diese Weise lassen sich nur sehr verdünnte Lösungen herstellen. Konzentrierte und kolloidales Se in fester Form lassen sich mit Hilfe von Schutzkolloiden nach dem Paalschen Verfahren, mit Protalbin- und Lysalbinsäure und deren Alkalisalzen gewinnen. — 3 g protalbinsaures Natrium in 45 ccm Wasser gelöst werden mit einer wässerigen Lösung von 1,63 g seleniger Säure versetzt. Hierbei scheidet sich Protalbinsäure aus, die durch Zusatz von Natronlauge wieder in Lösung gebracht wird. Durch Zugabe von 2 g käuflicher Hydrazinhydratlösung und Ansäuern mit verdünnter Salzsäure wird die selenige Säure reduziert und durch Erwärmen wird die Reduktion beendet. Die Adsorptionsverbindung von Se und Protalbinsäure scheidet sich in roten Flocken ab. Zusatz von Soda bringt die Fällung wieder in Lösung. Durch Dialyse gegen Wasser wird sie gereinigt. Das feste Kolloid erhält man durch Eintrocknen der auf dem Wasserbad konzentrierten Lösung im Vakuum über Schwefelsäure in dunkelroten, emailglänzenden Lamellen, die 32,7 % Se enthalten. Der Se-Gehalt läßt sich noch steigern. So erhielt Paal ein Produkt, welches neben freier Lysalbinsäure 97,06 % Se enthielt und dabei vollständig löslich war.

6. Valenz, Ionen. Se ist 2-, 4- und 6-wertig. 2-wertig im Se-Wasserstoff und in den Seleniden, deren wässerige Lösungen das Se als Anion enthalten. 4-wertig ist es in Verbindung mit Sauerstoff und den Halogenen. Ein Se^{IV}-Ion ist nicht existenzfähig. Es bildet mit Wasser SeO_3'' und H·-Ionen. In stark halogenwasserstoffsaurer Lösung scheint auch ein komplexes $[SeHal_6]''$-Ion zu existieren. Die Maximalvalenz 6 betätigt das Se in Verbindungen erster Ordnung nur gegen Fluor. Ein einfaches Oxyd SeO_3 scheint nicht existenzfähig zu sein. Bekannt ist vorläufig nur das Hydrat desselben, die Se-Säure, H_2SeO_4. Ein selbständiges Ion vermag Se^{VI} ebenfalls nicht zu bilden. In wässeriger Lösung ist es als komplexes SeO_4'' enthalten. — Se zeigt demnach in seinem Verhalten ausgesprochen metalloiden Charakter.

7. Spezielle Chemie. Se verbindet sich mit allen Elementen, außer den Edelgasen und wahrscheinlich auch Schwefel und Tellur. Seine Verbindungen ähneln teilweise sehr denen des Schwefels. — Mit Wasserstoff vereinigt sich Se nur in einem Verhältnis, zu SeH_2. Selenwasserstoff bildet sich aus den Elementen, durch Ueberleiten von Wasserstoff über erhitztes Se, gemäß der Gleichung $H_2 + Se \rightleftarrows SeH_2$. Bei 520° erreicht die Bildung von Se-Wasserstoff ihr Maximum, ist aber nicht vollständig. Zwischen 250 und 520° besteht für jede Temperatur ein Gleichgewicht zwischen Se-Dampf, Wasserstoff und Se-Wasserstoff. Es stellt sich in gleicher Weise von der Seite des SeH_2 wie von der der Komponenten ein, bei relativ niedrigen Temperaturen allerdings sehr langsam. Ein Beschlag von Se an den Gefäßwänden beschleunigt katalytisch die Einstellung. — Zur Darstellung von Se-Wasserstoff kann man die direkte Vereinigung der Elemente in der Wärme benutzen oder die Einwirkung von Säuren auf Se-Metalle. In beiden Fällen ist das Gas stark mit Wasserstoff verdünnt. Durch starke Abkühlung des Gemisches kann der Se-Wasserstoff fest und flüssig erhalten und so vom Wasserstoff befreit werden. Reiner Se-Wasserstoff soll sich auch bei der Einwirkung von wenig Wasser auf überschüssiges Al_2Se_3 bilden. — Schmelzpunkt = —68°; Siedepunkt = —41° bei 760 mm. Die Bildungswärme gemäß der Gleichung Se_α (fest) + H_2 (Gas) = H_2Se (Gas) beträgt —19,4 Kal. Se-Wasserstoff ist also stärker endotherm als Schwefelwasserstoff. — Se-Wasserstoff ist bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig, von außerordentlich peinlichem, an Schwefelwasserstoff erinnernden Geruch, aber noch giftiger wie dieser. Er reizt die Atmungsorgane und Augen zu langwierigen und schmerzhaften Entzündungen. — Trocken über Quecksilber aufbewahrt ist er bei Zimmertemperatur unbegrenzt haltbar, obwohl das Gleichgewicht auf seiten der Zersetzungsprodukte liegt. Bei Gegenwart von Luft und Feuchtigkeit tritt langsame Oxydation unter Ausscheidung von rotem Se ein. Wasser absorbiert ihn reichlich, ca. 3 Volume bei Zimmertemperatur. Die Lösung reagiert schwach sauer. Mit Schwermetallsalzen entstehen meist schwarz gefärbte unlösliche Selenide, die in ihrer Zusammensetzung den Sulfiden entsprechen. Die Selenide der Alkalien und alkalischen Erden sind wasserlöslich und reagieren stark alkalisch.

Sauerstoffverbindungen. Se bildet, soweit mit Sicherheit bekannt, nur ein Oxyd; es hat die Zusammensetzung SeO_2 und entsteht beim Verbrennen von Se im Sauerstoff und beim Eindampfen einer Lösung von Se in Salpetersäure. Im Gegensatz zu dem gasförmigen Schwefeldioxyd ist es ein fester Körper, der beim Erhitzen sublimiert ohne vorher zu schmelzen. Durch Abkühlen des Dampfes, der die Farbe des Chlorgases hat, kann es in langen weißen Nadeln gewonnen werden. Der Schmelzpunkt, im zugeschmolzenen Rohr unter dem eigenen Dampfdruck bestimmt, liegt bei 340°. Die Bildungswärme gemäß der Gleichung Se_α (fest) + O_2 (Gas) = SeO_2 (fest) beträgt 57,1 Kal. — Selendioxyd ist hygroskopisch und löst sich leicht in Wasser. Die Lösung enthält selenige Säure H_2SeO_3. Dampft man bis zur Sirupkonsistenz ein, so scheidet sich eine dieser Formel entsprechende Verbindung in großen farblosen salpeterähnlichen Kristallen aus. Beim stärkeren Erhitzen geht H_2SeO_3 in SeO_2 über. — Die wässerige Lösung reagiert sauer. Ihr molekulares Leitvermögen beträgt bei 25° und 1024 n-Verdünnung 285 (schweflige Säure unter den gleichen Umständen = 346). Man kann daher mit einiger Wahrscheinlichkeit darauf schließen, daß die selenige Säure schwächer ist wie die schweflige Säure. — Sie bildet mit allen Metallen primäre und sekundäre Salze, die Selenite. Alle primären Salze sind löslich und reagieren sauer, von den sekundären lösen sich nur die der Alkalien, mit alkalischer Reaktion. — Wie schweflige Säure ist auch selenige Säure leicht zu reduzieren. Während jene aber schon durch den Luftsauerstoff leicht oxydiert wird, findet bei der selenigen Säure ein Uebergang in Se-Säure nur schwierig und unter dem Einfluß starker Oxydationsmittel statt. Ein Oxyd der Formel SeO_3 ist nicht dargestellt. Man kennt Sauerstoffverbindungen des 6-wertigen Se nur in der Se-Säure und deren Salzen, den Seleniaten. In wässeriger Lösung

entsteht Se-Säure H_2SeO_4, bei der Einwirkung von Chlor auf selenige Säure. Zur Reindarstellung läßt man Chlor auf selenigsaures Kupfer einwirken, reinigt das so erhaltene selensaure Kupfer durch Umkristallisieren und scheidet aus der Lösung desselben das Kupfer elektrolytisch ab. Eine Reduktion der Se-Säure findet dabei nicht statt. Wasserfreie Se-Säure von der Formel H_2SeO_4 scheidet sich beim Abkühlen einer im Vakuum bei 180° konzentrierten Lösung als weiße, sehr hygroskopische Kristallmasse aus. Sie schmilzt bei 57 bis 58° und siedet im Hochvakuum bei 172° ohne Zersetzung. Bei Atmosphärendruck läßt sie sich nicht destillieren, da sie in der Hitze in Selendioxyd und Sauerstoff zerfällt. — Abgesehen von ihrer leichteren Reduzierbarkeit ist die Se-Säure der Schwefelsäure ähnlich. Ihre Stärke ist, wie aus Leitfähigkeit und Neutralisationswärme zu schließen ist, ungefähr die gleiche. Die Seleniate sind in Sulfaten isomorph und haben ähnliche Löslichkeitsverhältnisse. Seleniate 3-wertiger Metalle und Alkaliseleniate können Alaune bilden; auch den Doppelsulfaten vom Typus $Me^I_2\ (SO_4)_2\ Me^{II} + 6H_2O$ entsprechenden Seleniate sind in großer Anzahl bekannt.

Halogenverbindungen. Es sind zwei Fluoride bekannt, SeF_4 und SeF_6. Sie entstehen durch direkte Einwirkung der Elemente aufeinander, das erste bei Zimmertemperatur, das zweite bei —72°. SeF_4 schmilzt bei —80° und siedet bei 100°, SeF_6 ist gasförmig. — Mit Chlor existieren die Verbindungen Se_2Cl_2 und $SeCl_4$. Se_2Cl_2 entsteht bei der Einwirkung von Chlor auf Se, welches in konzentrierter Schwefelsäure gelöst ist. Es ist eine tiefrote Flüssigkeit und siedet bei 143°. Der Dampf ist orangefarbig und hat bei 200° die der Formel entsprechende Dichte. Die Eigenschaften ähneln dem S_2Cl_2. Es ist ein gutes Lösungsmittel für Se. — $SeCl_4$ wird durch Chlorierung des vorigen erhalten. Es ist bei Zimmertemperatur fest und verdampft unterhalb seines Schmelzpunktes. Der Dampf ist gelb gefärbt und hat bei 200° die normale Dichte. Bei höherer Temperatur tritt Dissoziation ein. Von Wasser wird es weitgehend hydrolysiert. — Mit Ammoniak bildet es unter anderem explosiven SeN. — Bromide sind analog zusammengesetzt. Zu erwähnen ist die Existenz von Doppelsalzen der allgemeinen Formel $[SeBr_6]Me^I_2$, die aus bromwasserstoffsaurer Lösung kristallisieren. — Jodide sind schlecht charakterisiert.

Se und Schwefel scheinen sich nicht zu verbinden. Die früher beschriebenen Produkte, durch Zusammenschmelzen von Schwefel und Se und Behandeln der Schmelze mit Schwefelkohlenstoff, oder durch Einwirkung von Schwefelwasserstoff auf wässerige selenige Säure erhalten, sind wohl als feste Lösungen und Adsorptionsverbindungen aufzufassen.

In organischen Verbindungen kann Schwefel häufig durch Se ersetzt werden.

8. Analytische Chemie. Qualitativ. Selenverbindungen geben auf Kohle vor dem Lötrohr erhitzt einen charakteristischen rettigähnlichen Geruch, der möglicherweise auf die Bildung von Selenkohlenstoff zurückzuführen ist. Die Bunsenflamme wird kornblumenblau gefärbt. — Aus Lösungen von seleniger Säure fällt durch Schwefelwasserstoff ein Gemisch von Se und Schwefel. Schwermetallsalze bilden in schwach sauren Lösungen unlösliche Selenite. Die bemerkenswerteste Eigenschaft der selenigen Säure ist die leichte Reduzierbarkeit durch naszierenden Wasserstoff, schweflige Säure, Hydrazinsalze u. a., welche das Se in roten Flocken ausfällen.— Selensäure unterscheidet sich von seleniger Säure durch die Unlöslichkeit ihres Baryumsalzes und die Nichtfällbarkeit durch schweflige Säure. — Ein empfindlicher Nachweis für elementares Se ist die grüne Farbe, mit der es sich in höchstkonzentrierter Schwefelsäure auflöst. Sie beruht auf der Bildung von $SeSO_3$.

Quantitativ. Sämtliche gewichtsanalytischen Methoden beruhen auf Reduktion der selenigen Säure zu Se, welches abfiltriert und gewogen wird. Als Reduktionsmittel dienen Schwefeldioxyd, phosphorige Säure, Hydroxylamin- und Hydrazinsalze, sämtlich in stark salzsaurer Lösung. — Zur maßanalytischen Bestimmung reduziert man selenige Säure mit Jodwasserstoffsäure und titriert das in Freiheit gesetzte Jod. — Se-Säure wird gewichtsanalytisch wie selenige Säure bestimmt. Maßanalytisch kann man sie als starke Säure alkalimetrisch bestimmen oder oxydimetrisch durch Kochen mit starker Salzsäure und Auffangen des freien Chlors in Jodkalilösung.

9. Photochemie, Selenzellen. Se vermehrt unter dem Einfluß des Lichtes, und zwar vorwiegend der langwelligen Strahlen, sein Wärmeleitungsvermögen und in gleicher Weise auch sein Leitvermögen für Elektrizität. Hört die Belichtung auf, so geht das elektrische Leitvermögen wieder auf den anfänglichen Wert zurück, allerdings nicht augenblicklich. Den Untersuchungen von Marc zufolge beruht diese Vermehrung der Leitfähigkeit im Licht auf einer Verschiebung des Gleichgewichtes $Se_A \rightleftarrows Se_B$ zugunsten von Se_B, also derjenigen Modifikation des Se, welcher allein ein Leitvermögen zukommt; hört die Belichtung auf, so stellt sich das Dunkelgleichgewicht wieder her. Gestützt wird diese Ansicht dadurch, daß ein von 200° auf Zimmertemperatur

abgeschrecktes Präparat, welches sehr viel mehr Se_B enthält, als dem Dunkelgleichgewicht entspricht, seine Leitfähigkeit durch Belichten nicht vermehrt. Die Lichtempfindlichkeit stellt sich erst nach einiger Zeit ein, wenn die Mengen von Se_A und Se_B sich dem Dunkelgleichgewicht nähern. Licht verschiebt also das Gleichgewicht im gleichen Sinne wie Erwärmung. — Dieses Verhalten des Se hat zur Konstruktion der sogenannten Selenzellen geführt. In einen Stromkreis ist in geeigneter Weise metallisches Se eingeschaltet. Solange sich dieses im Dunkeln befindet, ist sein Widerstand bedeutend, die Stromstärke dementsprechend gering. Fällt aber ein Lichtstrahl auf das Se, so sinkt sein Widerstand auf einen Bruchteil des Anfangswertes und die Stromstärke steigt entsprechend. Man kann auf diese Weise wechselnde Lichtintensitäten durch wechselnde Stromstärken kenntlich machen. Um die wirksame Se-Oberfläche möglichst groß zu gestalten, verfährt man nach Shelford-Bidwell so, daß man um ein Schiefertäfelchen zwei dünne Kupferdrähte isoliert voneinander in Form einer doppelgängigen Schraube herumführt. Die Drähte liegen etwa 1 mm voneinander entfernt. Der Zwischenraum zwischen beiden wird mit einer dünnen Se-Schicht ausgefüllt. An die Enden der Kupferdrähte wird die Stromquelle angelegt. Diese Selenzelle wird in ein Holzkästchen einmontiert: durch Oeffnen des Deckels kann sie dem Licht ausgesetzt werden. Ruhmer bringt die Zellen in evakuierten Glasbirnen von Glühlampenformen unter; der Widerstand dieser Zellen sinkt bei der Belichtung bis auf $^1/_{80}$ des Dunkelwiderstandes. — Alle Selenzellen besitzen eine gewisse „Trägheit“: Nach Aufhören der Belichtung steigt der Widerstand nicht augenblicklich auf den anfänglichen Wert an (s. den Artikel „Fernphotographie“.

10. Spektralchemie. Se liefert ein Bandenspektrum und ein Linienspektrum. Das Bandenspektrum entsteht beim Verbrennen des Se in der Bunsenflamme und beim Erhitzen von Se-Dampf in Quarzgefäßen. Das Linienspektrum entsteht im Geißler-Rohr und beim Durchschlagen von Funken durch Se-haltige Dämpfe. Die größte Helligkeit liegt im Gelbgrün und Blau. — Eine dünne Schicht amorphes Se absorbiert alle Strahlen von der D-Linie bis ins Ultraviolett. Se-Dampf absorbiert bei 700° von Rot bis Violett. Selenige Säure, wenig über ihre Verdampfungstemperatur erhitzt, zeigt im Blau und Violett zahlreiche Absorptionsstreifen.

11. Verwendung. Es sind zahlreiche Versuche gemacht worden, die photoelektrischen Eigenschaften des Se praktisch zu verwerten, z. B. in der Fernphotographie, Telephonie und Photometrie, doch wird diese Verwendung sehr erschwert durch die Trägheit des Se, sowie durch seine Unbeständigkeit äußeren Einflüssen gegenüber. — Eine ausgedehnte Anwendung findet das Se in der Glasfabrikation, zum Entfärben eisenhaltiger Glasflüsse und zum Violettfärben des Glases.

Literatur. **Berzelius**, *Lehrbuch der Chemie, II [1844], S. 195 bis 228.* — **Gmelin-Friedheim-Peters**, *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. I, 1 [1907], S. 705 fg.* — **R. Marc**, *Die physikalisch-chemischen Eigenschaften des metallischen Selens. Hamburg-Leipzig 1907.* — **Ruhmer**, *Das Selen und seine Bedeutung für die Elektrotechnik. Berlin 1902.* — **Chr. Ries**, *Die elektrischen Eigenschaften und die Bedeutung des Selens für die Elektrotechnik, 1908.*

d) Tellur.

Te. Atomgewicht 127,5.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4, Darstellung. 5. Formarten. 6. Valenz, Ionen. 7. Spezielle Chemie. 8. Analytische Chemie. 9. Spektralchemie.

1. Atomgewicht. Die internationale Kommission hat für 1912 das Atomgewicht 127,5 festgesetzt. — Es ist von jeher große Sorgfalt auf die Ermittlung des Atomgewichts verwendet worden. Dem periodischen System zufolge sollte es kleiner sein als das des Jods (126,92). Man glaubte daher, das gefundene höhere Atomgewicht sei einer Te-ähnlichen Verunreinigung, vielleicht dem von Mendelejeff vorausgesagten Ekatellur zuzuschreiben und hat sich bis in die neueste Zeit bemüht, das Te zu zerlegen, indessen erfolglos. Nachdem sich noch an einigen anderen Stellen des periodischen Systems ähnliche Abweichungen herausgestellt haben, durch die seine strenge Gültigkeit erschüttert wurde, braucht man wohl keinen Zweifel mehr an der Einheitlichkeit des Te und an der Richtigkeit des ermittelten Atomgewichts zu hegen.

2. Vorkommen. Te ist ein sehr seltenes Element. Es findet sich mit Gold und Silber verunreinigt als gediegenes Te in Siebenbürgen vor, allerdings sehr spärlich. Etwas häufiger sind Telluride, z. B. Tellurwismut und Schrifterz (Silber-Gold-Tellur). Mit Metallsulfiden kommt es vor als Tetradymit (Wismut-Tellur-Schwefel) und Blättererz (Kupfer-Blei-Antimon-Tellur-Schwefel). Auch in Pyriten und in Schwefel ist es mitunter in kleiner Menge enthalten, häufig neben Se. Fundstätten liegen in allen Erdteilen, für Europa kommt vorwiegend Ungarn in Betracht.

3. Geschichte. Müller von Reichenstein erkannte 1782 Siebenbürgisches Te als verschieden von Antimon und Wismut. Bergman bestätigte seine Ansicht. Klaproth stellte 1798 fest, daß man es mit einem neuen Metall zu tun habe, und gab

ihm den Namen (tellus = Erde). Eine eingehende chemische Untersuchung verdanken wir Berzelius.

4. Darstellung. Man schließt die Erze durch Erhitzen mit konzentrierter Schwefelsäure auf, verdünnt mit Wasser und fällt durch Salzsäure das Silber aus. Die Lösung, welche das Te als „basisches" Sulfat enthält, wird dann tagelang mit Schwefeldioxyd behandelt; das Sulfat wird reduziert und es scheidet sich schwarzes amorphes Te ab. Dieses wird getrocknet und kommt in Stangen gegossen als Rohtellur, mit ca. 80% Te (Hauptverunreinigung Kupfer) in den Handel. Neuerdings werden Te und auch Se in Amerika als Nebenprodukte bei der Kupfergewinnung in großer Reinheit dargestellt und zu mäßigen Preisen in den Handel gebracht. — Zur Reinigung löst man das Rohtellur in Salpetersäure, dampft mit Salzsäure ab, reduziert mit Schwefeldioxyd, und wiederholt diese Operationen gegebenenfalls. — Handelt es sich speziell um eine Entfernung von Se, so nimmt man den Abdampfrückstand in Salzsäure vom sp. G. 1,175 auf; beim Einleiten von Schwefeldioxyd fällt jetzt nur das Se aus, Te erst beim Verdünnen mit Wasser. Durch zweimalige Destillation im Hochvakuum kann man die Reinheit noch steigern. Technische Verwendung findet das Te nicht.

5. Formarten, kolloidales Tellur. Vom Te sind nur zwei Modifikationen bekannt. Das Gebiet ist allerdings bisher nicht sehr ausgiebig bearbeitet worden. Amorphes Te fällt als braunes Pulver aus Lösungen bei der Reduktion mit Schwefeldioxyd. Auch ist es in beträchtlicher Menge in rasch erstarrten Schmelzflüssen vorhanden. Seine Dichte ist 5,9 bis 6,0. Bei 300° bleibt es noch unverändert. — Die zweite, metallische Form entsteht beim langsamen Abkühlen des geschmolzenen Te. Das so erhaltene Te ist weißglänzend, von kristallinischem Gefüge, spröde und pulverisierbar. Auch aus Kaliumtelluridlösungen scheidet sich unter dem Einfluß des Luftsauerstoffs die metallische Form ab. Die Verbrennungswärme des amorphen Te beim Uebergang in TeO_2 beträgt 41,6 Kal., die des kristallinen 66,8. Die kristalline Form ist also, umgekehrt wie beim Se, energiereicher wie die amorphe. Kristallines Te und graues Se sind isomorph. — Dichte des metallischen Te: 6,15 bis 6,25. Schmelzpunkt: ca. 450°. Siedepunkt: 1390° bei 760 mm, 471° im Kathodenvakuum. — Das elektrische Leitvermögen ist gering; die Angaben über seine Veränderlichkeit im Licht widersprechen sich. — Tellurdampf hat von 1390 bis 1880° ungefähr die der Formel Te_2 entsprechende Dichte. — Kolloidales Tellur existiert in blauen unbeständigen und braunen beständigeren Formen. Durch Dispersion von metallischem Te mittels kathodischer Beladung entstehen braune Sole, durch Reduktion von telluriger und Tellur-Säure je nach den Versuchsbedingungen braune oder blaue. Flüssige, ziemlich haltbare Sole lassen sich schon ohne Schutzkolloide erhalten, feste reversible Kolloide nur unter Anwendung solcher. Mit freier Lysalbinsäure konnte Paal eine vollkommen lösliche Adsorptionsverbindung mit 83,75 Te darstellen. Blaue Verbindungen entstehen bei Verwendung von Hydroxylamin als Reduktionsmittel, braune durch Hydrazin. Die blauen Kolloide werden beim Aufbewahren größtenteils unlöslich.

6. Valenz, Ionen. Te ist im TeH_2, in den Telluriden und im $TeCl_2$ 2-wertig, im TeO_2, in den Telluriten und im $TeCl_4$ 4-wertig, im TeO_3, in der Tellursäure und ihren Salzen, und im TeF_6 6-wertig. 2-wertig tritt es nur als Anion auf; wo man sein Auftreten als 2-wertiges Kation erwarten sollte, beim Lösen von $TeCl_2$, findet Zersetzung in metallisches Te und Te_{IV} statt. 4-wertiges Te bildet in Lösung vorwiegend die Komplexe $[TeHal_6]''$ und TeO_3'', doch existiert dem metallischen Charakter des Te entsprechend wahrscheinlich auch ein $Te^{····}$-Ion. 6-wertiges Te bildet $[TeO_4(H_2O)_2]''$ möglicherweise sogar TeO_6''''''. — Te zeigt das eigentümliche Verhalten, in stark alkalischer Lösung anodisch und kathodisch elektromotorisch wirksam in Lösung gehen zu können; es kann also in demselben Elektrolyten positive und negative Ionen bilden.

7. Spezielle Chemie. Te verbindet sich außer mit Schwefel und Se und den Edelgasen wahrscheinlich mit allen Elementen. — Te-Wasserstoff, TeH_2, ist ein farbloses, ähnlich dem SeH_2 riechendes Gas. Etwa bei 0° unter Atmosphärendruck verdichtet es sich zu einer gelbgrünen Flüssigkeit, die bei ca. —50° zu gelben Nadeln erstarrt. TeH_2 ist stark endotherm (Te [fest] + 2H [Gas] = TeH_2 [Gas] = —35 Kal.), mehr wie SH_2 und SeH_2. Eine Bildung von TeH_2 durch direkte Vereinigung der Elemente ist nicht mit Sicherheit beobachtet worden, vielmehr zerfällt er bereits in der Kälte, auch bei Ausschluß von Luft und Feuchtigkeit in kurzer Zeit. — Aus Magnesiumtellurid und Wasser soll reiner Te-Wasserstoff entstehen. Mit 55,8% Wasserstoff vermischt, erhält man ihn bei Elektrolyse 50-prozentiger Schwefelsäure unter starker Kühlung an einer Te-Kathode. — Te-Wasserstoff brennt mit bläulicher Flamme. Die wässerige Lösung rötet Lackmus schwach und ist sehr zersetzlich. Bei Ersatz des Wasserstoffs durch Metalle entstehen Telluride.

Sauerstoffverbindungen. Ausführlicher beschrieben sind nur die Oxyde

TeO_2 und TeO_3. — TeO_2 bildet sich beim Verrennen von Te. Zur Darstellung behandelt man Te mit starker Salpetersäure, verdampft zur Trockne und erhitzt zur Zersetzung der basischen Nitrate. Das Oxyd ist farblos und kristallinisch, schmilzt bei beginnender Rotglut und ist bei sehr hoher Temperatur flüchtig. In Wasser ist es praktisch unlöslich, mehr in Säuren, leicht in Alkalien. Aus saurer Lösung lassen sich Verbindungen des TeO_2 mit der betreffenden Säure isolieren. Am bekanntesten ist das „basische" Nitrat $(TeO_2)_2.HNO_3$, welches zu Atomgewichtsbestimmungen verwendet worden ist. — In den alkalischen Lösungen liegen Salze der sehr schwachen tellurigen Säure vor, die Tellurite. Sie sind leicht zu oxydieren und zu reduzieren. — Eine sehr unbeständige hydratische Form des TeO_2, sogenannte tellurige Säure, H_2TeO_3, erhält man beim Eingießen von salpetersauren Te-Lösungen in viel Wasser als voluminösen weißen Niederschlag, der aber bereits bei Zimmertemperatur allmählich in die wasserfreie Form übergeht. — Tellurtrioxyd, TeO_3, entsteht aus Te-Säure bei 400°. Es ist ein orangegelbes, wasserunlösliches Pulver, welches nur von konzentriertem Alkali (unter Telluratbildung) und von konzentrierter Salzsäure (unter Reduktion) angegriffen wird. Beim starken Erhitzen geht es unter Sauerstoffabgabe in TeO_2 über. — Te-Säure wird erhalten durch Oxydation von Alkalitellurit mit Wasserstoffsuperoxyd, Ausfällen mit konzentrierter Salpetersäure und Umkristallisieren. In Wasser ist sie leicht löslich. Te-Säure hat wenig Beziehung zur Schwefel- und Se-Säure. Ob eine Säure der entsprechenden Formel H_2TeO_4 überhaupt existiert, ist fraglich; man hat sie bisher nur in polymerer Form, an Metaphosphorsäure erinnernd, dargestellt. Dagegen ist die Existenz der Hydrate $H_2TeO_4.6H_2O$ und $H_2TeO_4.2H_2O$ (gewöhnliche Te-Säure) nachgewiesen. Ihr Umwandlungsprodukt liegt bei ca. 10°. Die Te-Säure $H_2TeO_4.2H_2O$ ist im Gegensatz zur H_2SO_4 und H_2SeO_4 nur sehr schwach sauer. Etwa 50-mal so stark wie die gewöhnliche Te-Säure ist die polymere $(H_2TeO_4)_x$. Die zwei Moleküle Wasser scheinen, wie aus der Gefrierpunktserniedrigung hervorgeht, dem Molekül der Säure anzugehören. Auch die Fähigkeit, mit Glycerin eine komplexe, gegen Phenolphtalein einbasische Säure zu bilden, spricht für das Vorhandensein von mehr als zwei Hydroxylen im Molekül. Salze, Tellurate, bildet Tellursäure mit 2, 4 und 6 Atomen Me^I, und zwar machen die Verbindungen mit 4 und 6 Metallatomen nicht den Eindruck basischer Salze. Man könnte demnach die Te-Säure als 6-basisch auffassen und $Te(OH)_6$ schreiben. Allerdings würde eine solche Verbindung völlig ohne Analogon dastehen. — Bei den erwähnten Unterschieden zwischen Schwefel- und Se-Säure einerseits und Te-Säure andererseits ist es nicht auffallend, daß die Tellurate den Sulfaten und Seleniaten weder isomorph noch ähnlich sind. Auf Grund dieser Verschiedenheit wird von manchen Autoren die Zugehörigkeit des Te zur Sauerstoffgruppe bestritten.

Halogenverbindungen. Es existieren die Fluoride, TeF_4 und TeF_6. TeF_6 bildet sich aus Fluor und Te bei —78°. Es ist bei Zimmertemperatur gasförmig, wird bei ca. —35° und 760 mm flüssig und wenig tiefer fest. — Die Chloride haben die Zusammensetzung $TeCl_2$ und $TeCl_4$. $TeCl_2$ entsteht beim Erhitzen von Te mit $TeCl_4$. Es ist eine bei Zimmertemperatur amorphe schwarze Masse, schmilzt bei ca. 175° zu einer schwarzen Flüssigkeit und siedet bei 327°. Der rote Dampf hat bei 440° die normale Dichte. Von Wasser wird es zerlegt in Te und TeO_2. $TeCl_4$ wird durch Einwirkung von Chlor auf Te in der Wärme erhalten als weiße kristallinische Masse. Der Schmelzpunkt liegt bei 214 bis 215°, der Siedepunkt bei 380°; der Dampf hat bei 448° die normale Dichte. Bei Zimmertemperatur addiert es vier Moleküle trockenes Ammoniak. Mit flüssigem Ammoniak reagiert es bei —15° unter Bildung von explosivem Te-Stickstoff, TeN. — In schwach salzsaurer Lösung bestehen mit Alkalichloriden gelbgefärbte Doppelverbindungen der Zusammensetzung $TeCl_4Me^I_2$. — Aehnlich sind die Bromide. — Von Jodiden ist nur TeJ_4 bekannt.

8. Analytische Chemie. Qualitativ. Alle Te-Verbindungen färben die Bunsenflamme blaugrün. In der oberen Reduktionsflamme werden sie zu Te reduziert, welches sich an einer kalten Porzellanschale als schwarzer Anflug ansetzt, der sich in ganz konzentrierter Schwefelsäure mit roter Farbe auflöst (Bildung von $TeSO_3$). Schwefelwasserstoff schlägt aus Lösungen von telluriger Säure ein braunes Gemisch von Te und Schwefel nieder. Die meisten Reduktionsmittel scheiden Te ab. Aus alkalischen Telluritlösungen wird durch Säuren TeO_2 gefällt, welches sich im Ueberschuß der Säure wieder löst. — Te-Säure gibt mit allen Schwermetallsalzen Niederschläge. Beim Kochen mit konzentrierter Salzsäure entwickelt sich Chlor. Reduktionsmittel wirken schwieriger wie auf tellurige Säure.

Quantitativ. Gewichtsanalytische Methoden beruhen auf der Reduktion von telluriger Säure zu Tellur, welches bei 105° getrocknet und gewogen wird. Eine Schwierigkeit liegt darin, daß sich das Te häufig in unfiltrierbarer kolloidaler Form abscheidet.

Durch gleichzeitige Anwendung von Schwefeldioxyd und Hydrazinhydrochlorid als Reduktionsmittel, eventuell durch Vornahme der Fällung unter Druck, wird diesem Uebelstande begegnet. — Maßanalytische Methoden eignen sich vorwiegend zur Bestimmung der Te-Säure. Man kann diese nach Zusatz von Glycerin als einbasische Säure mit Alkali titrieren (Phenolphtalein als Indikator). Genauer ist die Fällung mit überschüssigem titriertem Barytwasser — es bildet sich unlösliches $BaTeO_4$ — und Rücktitration des Barytüberschusses mit Oxalsäure.

9. Spektralchemie. Te liefert ein Linien- und ein wenig untersuchtes Bandenspektrum. Das Linienspektrum entsteht im elektrischen Funken zwischen Tellurelektroden, in Vakuumröhren und im Lichtbogen. Es erstreckt sich vom Rot bis weit ins Ultraviolett. Die hellsten Linien haben die Wellenlängen 6438, 5756, 5708 und 5649 $\mu\mu$.

Literatur. ***Berzelius***, *Lehrbuch der Chemie (5. Aufl.), II, S. 228 bis 249 [1844].* — ***Gmelin-Friedheim-Peters***, *Handbuch der anorganischen Chemie, III, 2 [1908], S. 852 fg.*

P. Praetorius.

e) Chrom.

Cr. Atomgewicht 52,0.

1. Geschichte. Bei der Analyse eines sibirischen Bleierzes fand Vauquelin 1797 ein bis dahin unbekanntes Element, das er wegen der prächtigen Färbung seiner Verbindungen als Chrom (χρῶμα, Farbe) bezeichnete. Bis in die neueste Zeit hat das Chrom dauernd das Interesse des Chemikers gefesselt, einerseits wegen der Mannigfaltigkeit seiner Verbindungen, dann wegen deren vielseitiger technischer Anwendbarkeit, besonders aber, weil es zahlreiche auffällige Erscheinungen von allgemeiner Bedeutung zeigt.

2. Vorkommen. Chrom findet sich in der Natur nicht in großen Mengen, ist aber doch ziemlich verbreitet. Als Metall soll es in gewissen Meteoriten gefunden sein. Sonst kommt es nur in gebundenem Zustand vor. Sein wichtigstes Erz ist der Chromeisenstein oder Chromit, ein spinellartiges Mineral der idealen Zusammensetzung $FeO.Cr_2O_3$, in dem aber meist noch Mg, Mn und Al vorhanden sind. Als Chromtrioxyd findet sich das Element im Rotbleierz (Krokoit, $PbCrO_4$) und einigen ähnlichen Mineralien. In untergeordneter Menge ist Chrom in Spinellen und zahlreichen Silikaten nachgewiesen worden. In pflanzlichen und tierischen Stoffen ist es nur sehr selten.

3. Verarbeitung der Chromerze. Ausschließlich Chromeisenstein kommt für die technische Herstellung von Chrompräparaten in Betracht. Zu diesem Zweck wird das Erz mit basischen Zuschlägen ($NaOH$, KOH, CaO, Na_2CO_3, K_2CO_3) in Flammherden dem oxydierenden Schmelzen unterworfen, wobei unter der gemeinsamen Wirkung der Alkalien und des Luftsauerstoffes lösliche Chromate entstehen: z. B. $2Fe(CrO_2)_2 + 4Na_2CO_3 + 7O = Fe_2O_3 + 4Na_2CrO_4 + 4CO_2$. Durch Auslaugen der Schmelze trennt man das Chromat von den unlöslichen basischen Erzbestandteilen und durch Zusatz von Säuren oder durch Elektrolyse der Lösung führt man das gelöste Chromat in Bichromat über, das nach geeigneter Konzentrierung auskristallisiert. Kalium- oder Natriumbichromat bildet demnach das wichtigste Rohmaterial für alle anderen Chromverbindungen.

4. Darstellung des Metalles. Die Reduktion von Chromsauerstoffverbindungen mit Kohle durch starkes Erhitzen führt durchweg zu kohlehaltigem Metall. Dagegen erhält man reines Chrom durch Erhitzen von Gemischen des $CrCl_3$ mit NaCl oder KCl mit Alkalimetallen oder zweckmäßiger mit Zink oder Magnesium: besonders das letztere soll gute Ausbeuten liefern. Weit übertroffen werden aber diese älteren Methoden durch das „aluminothermische“ Verfahren, bei dem ein Gemisch äquivalenter Mengen Cr_2O_3 und Aluminiumgries durch eine Zündpille zur Reaktion gebracht wird; hierbei ist — für Versuche im kleinen Maßstabe — ein Zusatz von CrO_3 notwendig: z. B. 120 g CrO_3 auf 600 g Cr_2O_3 + 270 g Al. — Auch im elektrischen Lichtbogenofen läßt sich unter geeigneten Verhältnissen aus Cr_2O_3 und C reines Chrom erhalten und ferner gelingt die Abscheidung des Metalles durch Elektrolyse aus wässerigen Chromisalzlösungen, die Chromosalz enthalten, wenn bestimmte Versuchsbedingungen eingehalten werden.

5. Eigenschaften des Metalles. 5a) Physikalische Eigenschaften. Chrommetall ist glänzend hellgrau und gut polierbar; es kristallisiert in regulären Pyramidenwürfeln. Sein spezifisches Gewicht (bei mittlerer Temperatur) wird zu 6,7 bis 7,1, im Mittel zu 6,9 angegeben. Die Härte (nach der Mohs'schen Skala) ist = 9; das Metall ist sehr spröde.

Die mittlere spezifische Wärme zwischen T° und t° ($C_{t^\circ}^{T^\circ}$) ist: $C_{+20^\circ}^{+600^\circ} = 0{,}129$, $C_{+20^\circ}^{+100^\circ} = 0{,}109$, $C_{+20^\circ}^{-185^\circ} = 0{,}0794$. Der Schmelzpunkt liegt bei etwa 1550°, der Siedepunkt bei 2200°. — Das Metall ist nicht magnetisch.

5b) Chemische Eigenschaften. Das kompakte Metall ist gegen chemische Agentien sehr widerstandsfähig: es oxydiert sich an der Luft erst bei starkem Erhitzen; auch mit S, N, C, Si, B reagiert es erst bei hoher Temperatur. In Halogenwasserstoffsäuren und Schwefelsäure löst es sich — in der Kälte langsam, schnell in der Hitze — zu Chromosalzen, dagegen wird es von oxydierenden Säuren nicht angegriffen (s. hierzu den folgenden Abschnitt), wohl aber von geschmolzenem KNO_3 und $KClO_3$.

Außer dem kompakten, regulinischen Metall ist noch ein „pyrophores" und ein „schwammiges" Chrom beschrieben.

6. Elektrochemie. Das Chrom gehört zu den Metallen, deren Platz in der Spannungsreihe nicht festliegend, sondern je nach der Vorbehandlung wechselnd ist. Im extrem aktiven Zustand verhält es sich elektrochemisch wie Zink und Cadmium, im extrem passiven Zustand wie ein Edelmetall; der Wechsel zwischen beiden Zuständen erfolgt aber nicht sprunghaft, sondern stetig und zwar so, daß der jeweilige elektrochemische Zustand des Metalles — der nur auf die Oberfläche beschränkt ist — gegeben ist durch das Medium, in dem es sich befindet. Der extrem passive Zustand wird erzeugt durch Oxydationsmittel und durch anodische Polarisation mit hinreichend kräftigen Strömen; daher rührt denn auch die Beständigkeit des Metalles gegen oxydierende Agentien. — Der aktive Zustand wird in mehr oder weniger hohem Maße hervorgerufen durch Lösungen von HCl, HBr, HJ, HF, H_2SO_4 usw., durch gelöste und geschmolzene Halogensalze sowie durch kathodische Polarisation. Beide Zustände dauern aber unverändert nur, solange die wirkende Ursache vorhanden ist; fällt diese fort, so nimmt das Metall — mit mehr oder weniger großer Geschwindigkeit an der Luft einen mittleren Zustand (Luftpotential) an. — Das extrem aktive Chrom hat das Normalpotential $\varepsilon_h = -0{,}6$ V (Zink hat — 0,76, Cadmium — 0,40), es löst sich in Säuren, und reduziert Cu- und Ag-Lösungen. Das extrem passive Chrom verhält sich wie ein Edelmetall; sein Potential ist $\varepsilon_h = +1{,}19$. Es löst sich in keiner Säure; als Anode eines Stromes löst es sich zu Chromsäure, wenn die Spannung + 0,6 V oder mehr beträgt. Man betrachtet jetzt meist den aktiven Zustand als den natürlichen und nimmt an, daß der passive durch Auflösung wechselnder Mengen Sauerstoff im Metall hervorgerufen wird.

In engem Zusammenhang mit diesem elektrochemischen Verhalten steht die interessante Tatsache, daß einzelne Muster aluminothermisch gewonnenen Chroms von Säuren mit regelmäßig periodisch sich ändernder Geschwindigkeit gelöst werden, wobei gleichzeitig in denselben Perioden das Potential um etwa 0,1 V schwankt.

7. Legierungen. Durch Zusatz von Chrom werden die mechanischen Eigenschaften gewisser Eisensorten günstig beeinflußt; der Chromstahl ist von erheblicher technischer Bedeutung. — Eine Legierung von Nickel und Chrom — Nichrom — beginnt wegen ihres hohen elektrischen Widerstandes und ihrer Beständigkeit bei hohen Temperaturen als elektrisches Widerstandsmaterial, besonders für Heizkörper, eine Rolle zu spielen. — Auch anderen Metallen soll das Chrom wertvolle Eigenschaften verleihen.

8. Allgemeine Charakteristik der Chromverbindungen; Stellung des Elementes im periodischen System. Die Verbindungsformen des Chroms sind sehr mannigfaltig; das Element tritt in ihnen 2-, 3-, 5-, 6-, 7-wertig auf. Der Stellung des Chroms in der 6. Reihe des periodischen Systemes als 1. Glied der Nebengruppe Cr, Mo, W, U entspricht das höchste stabile Oxyd $Cr^{VI}O_3$ — eine Säure, deren Salze zu den analogen Verbindungen der anderen Glieder der sechsten Gruppe, den Sulfaten, Selenaten, Molybdaten, Wolframaten viele Beziehungen zeigen. Die nähere Verwandtschaft mit Mo und W ergibt sich aus der — mit dem Atomgewicht steigenden — Fähigkeit zur Bildung von iso- und heterokondensierten Säuren. Die niederen Oxydationsstufen des Chroms zeigen viele Aehnlichkeiten mit den Verbindungen der benachbarten Elemente Ti, V, Mn, Fe, Co, die derselben Horizontalreihe des Systems angehören. — Die Verbindungen von Cr^{VII} — die Perchromate — nehmen eine ziemlich isolierte Stellung ein.

9. Technische Verwendung. Technische Verwendung findet Chrommetall zu Legierungen (s. unter 7). In der Färberei und Druckerei dienen Chromisalze und Chromate zum Beizen, Entwickeln, Fixieren und Aetzen; zum Reduzieren sollen Cr^{II}-salze Anwendung finden. — Das Gerben von Leder mit Chromisalzen und Chromaten hat neuerdings erhebliche Wichtigkeit erlangt. Zum Bleichen von Palmöl, Reinigung von Holzessig, Entfuseln von Branntwein, Herstellung von Zündmassen dienen Chromate, deren Anwendung als energische Oxydationsmittel aber besonders für die Industrie organischer Farbstoffe — Alizarin! — von Wichtigkeit ist. Chromate finden auch ausgedehnte Anwendung in der

photographischen Reproduktionstechnik, auf Grund der Tatsache, daß Gemische von Leim oder Gelatine mit Chromaten durch Belichtung in Wasser unlöslich werden. Die älteste und bekannteste Anwendung finden aber die Chromverbindungen als Farbstoffe für Anstrichfarben, Tapetendruck und Porzellanmalerei. Die Chromate von Blei, Zink, Cadmium, Calcium und Kupfer liefern gelbe, rote und braune Töne (Chromgelb, Chromrot); Chromioxyd und Chromiphosphat stellen grüne Farbstoffe dar (Chromgrün). Alle Chromfarben sind an der Luft unveränderlich, zum Teil feuerbeständig und — soweit sie nicht Blei enthalten — relativ ungiftig (vgl. den Artikel „Farben").

10. Verbindungen des zweiwertigen Chroms; Chromoverbindungen. Diese wurden 1843 entdeckt. Ihre Darstellung erfolgt einerseits durch Reduktion von Chromisalzen in fester Form mit Wasserstoff in der Hitze oder in Lösung mit naszierendem Wasserstoff (Zink und Salzsäure), andererseits durch Einwirkung gasförmiger oder gelöster Säuren auf Chrommetall. Wegen der überaus großen Oxydierbarkeit der Chromosalze müssen diese Operationen unter völligem Luftabschluß erfolgen.

Eigenschaften. Wasserfreie Chromosalze sind vielfach weiß, die wasserhaltigen von starken Säuren blau, von schwachen Säuren gelb, braun und rot gefärbt. Die leichtlöslichen Chromosalze geben himmelblaue Lösungen, die rot und orange im Spektrum absorbieren, aber keine Absorptionsstreifen besitzen. Die charakteristischste Eigenschaft der Chromosalze ist ihre große Oxydierbarkeit (starkes Reduktionsvermögen). Sie absorbieren — fest oder gelöst — Sauerstoff und Stickoxyd; sie fällen aus $HgCl_2$-Lösung HgCl, aus Kupfersalzen Cuproverbindungen und scheiden nicht nur Gold und Platin, sondern auch Zinn metallisch aus Lösungen ab, ebenso reduzieren sie viele Farbstoffe, z. B. Indigo, Alizarin. In saurer Lösung entwickeln die Chromosalze — besonders unter dem Einfluß von Katalysatoren wie Au, Pt, Hg — Wasserstoff: $2\,Cr^{\cdot\cdot} + 2\,H^{\cdot} = 2\,Cr^{\cdot\cdot\cdot} + H_2$ (Umkehrung der Bildungsreaktion). Diesem außerordentlichen Reduktionsvermögen entsprechend ist das Normalpotential des Vorganges $Cr^{\cdot\cdot} \rightarrow Cr^{\cdot\cdot\cdot}\ {}_0\varepsilon_h = -0{,}4$ V, während es für $Fe^{\cdot\cdot} \rightarrow Fe^{\cdot\cdot\cdot} + 0{,}75$ V beträgt. Im übrigen zeigen die $Cr^{\cdot\cdot}$-Salze viel Aehnlichkeit mit den $Fe^{\cdot\cdot}$ und $Mn^{\cdot\cdot}$-Salzen. Ihre Ionenreaktionen sind folgende: OH′ fällt braungelb, nicht jedoch Ammoniak in Gegenwart von Ammonsalzen; $S^{\cdot\cdot}$ fällt schwarz, $CO_3^{\cdot\cdot}$ (im Ueberschuß) gibt gelb-rotbraune Niederschläge; Acetat färbt rot oder gibt roten Niederschlag, Oxalsäure fällt gelb.

Chromofluorid, CrF_2, aus Cr und HF-Gas. Spezifisches Gewicht 4,11; wenig löslich.

Chromochlorid, $CrCl_2$, Chrom(II)-chlorid, Chromchlorür, entsteht aus Cr + durch HCl-Gas bei Rotglut oder durch Reduktion von $CrCl_3$ mit NH_4Cl oder H_2; weiße Nadeln, schwer flüchtig, sehr hygroskopisch, stark löslich; aus der Lösung können $CrCl_2.4H_2O$, blaue Nadeln, und $CrCl_2.6H_2O$, blaue Prismen, erhalten werden. Die Chloridlösung entsteht einfach — aber nicht frei von $CrCl_3$ — durch Auflösen von Metall in warmer Salzsäure.

Chromobromid, $CrBr_2$, und Chromojodid, CrJ_2, sind nach Darstellung und Eigenschaften dem Chlorid sehr ähnlich.

Chromocyanid und Chromorhodanid sind als solche nicht bekannt, wohl aber ihre Komplexsalze $[Cr^{II}(CN)_6]K_4$, dunkelblaue, sehr zersetzliche Kristalle und $[Cr^{II}(SCN)_5]Na_3.11\,H_2O$, dunkelblaue Nadeln, die an trockener Luft ziemlich beständig sind.

Chromohydroxyd, $Cr(OH)_2$, Chromhydroxydul, und Chromooxyd, CrO, Chromoxydul, sind nicht sicher bekannt.

Chromosulfid, CrS, Chromsulfür, entsteht aus Cr und H_2S bei sehr hoher Temperatur, schwarze Kristalle, d = 4,08, sehr beständig.

Chromosulfat, $Cr(SO_4).H_2O$, bildet sich aus dem Acetat und konz. H_2SO_4. Weißes Kristallpulver, das durch Wasser leicht in blaue Kristalle von $CrSO_4.7H_2O$ übergeht; dieses bildet die Doppelsalze $CrK_2(SO_4)_2.6H_2O$ und $Cr(NH_4)_2.(SO_4)_2.6H_2O$.

Chromocarbonat, $CrCO_3$.aq, wird als amorpher Niederschlag aus $Cr^{\cdot\cdot}$-Lösungen und Alkalicarbonaten erhalten; mit Ueberschuß der letzteren entstehen die kristallisierten Doppelcarbonate $CrK_2(CO_3)_2.1,5H_2O$, gelb, $CrNa_2(CO_3)_2.10H_2O$, rotbraun, $CrNa_2(CO_3)_2.H_2O$, gelb, $Cr(NH_4)_2.(CO_3)_2.H_2O$, gelb.

Chromoacetat, $Cr(CH_3CO_2)_2$.aq, bildet sich als roter Kristallniederschlag aus $Cr^{\cdot\cdot}$-Lösung und Acetaten; sehr wenig löslich, nur feucht haltbar.

Chromooxalat, $CrC_2O_4.H_2O$, entsteht aus Acetat und Oxalsäure; gelbes Kristallpulver, sehr wenig löslich, sehr beständig.

11. Verbindungen des dreiwertigen Chroms; Chromiverbindungen. **11a)** Allgemeines. Es sind durchweg sehr beständige Stoffe, die man entweder direkt durch Reduktion von CrO_3 oder Chromaten in saurer Lösung erhält oder indirekt, indem man aus den so reduzierten Lösungen Chromihydroxyd fällt und dies in die Salze verwandelt. — Das dreiwertige Chrom bildet ganz verschiedenartige Verbindungstypen; den wichtigsten von ihnen stellen die normalen violetten Chromisalze dar, die in Lösung die Reaktionen des $Cr^{\cdot\cdot\cdot}$- oder richtiger

$[Cr(H_2O)_6]^{\cdots}$-Ions liefern und hauptsächlich von starken Anionen, z. B. F′, Cl′, Br′, J′, OH′, ClO_3', BrO_3', SO_4'', S_2O_6'', NO_3', PO_4''', CH_3CO_2' usw., gebildet werden. Dieselben Anionen liefern aber auch die grünen Chromisalze, die vielfach mit den violetten isomer sind, aber den Säurerest zum Teil oder völlig in komplexer Bindung enthalten. Diesen einfachen Salzen sind anzureihen die bei hohen Temperaturen entstehenden Verbindungen mit S, Se, N, P, B, C, Si. — Mit schwächeren Säuren, besonders den organischen, bildet Cr^{III} hauptsächlich komplexe Anionen von großer Beständigkeit, z. B. mit SO_3'', CN′, CNS′, Oxalsäure, Weinsäure usw. Bestandteil des Anions ist Cr^{III} auch in den Chromiten und Sulfochromiten. Endlich liefert Cr^{III} mit NH_3 und seinen Derivaten eine große Zahl komplexer Kationen, die Chromammine, die im folgenden Abschnitt gesondert behandelt werden. — Die Vielseitigkeit der Verbindungsformen deutet darauf, daß Cr^{III}, ebenso wie das ihm nahe verwandte Al^{III} und Fe^{III}, eine sehr geringe Elektroaffinität besitzt. Die folgende allgemeine Charakteristik bezieht sich nur auf die violetten Chromisalze und ihre grünen Umwandlungsprodukte; alle übrigen Verbindungen zeigen so individuelle Züge, daß sie einer gemeinsamen Behandlung nicht zugänglich sind. — Die violetten Chromsalze lösen sich meist mit blauvioletter Farbe in Wasser. Die Lösungen haben alle im sichtbaren und im ultravioletten Gebiet dasselbe nicht sehr charakteristische Absorptionsspektrum; aus ihnen fällt OH′ $Cr(OH)_3$, PO_4''' violettes Phosphat, C_2O_4'' violettes Oxalat. H_2S fällt nicht, $(NH_4)_2S$ liefert nur Hydroxyd. Diese charakteristischen normalen Ionenreaktionen unterliegen nun zahlreichen Störungen sobald 1. Chromitbildung eintreten kann oder 2. irgendwelche komplexbildenden Stoffe vorhanden sind. — Die violetten Chromisalze $[Cr(OH_2)_6]X_3$ gehen sowohl in fester Form wie in Lösung freiwillig — besonders bei erhöhter Temperatur — in isomere oder doch nahe verwandte grüne (modifizierte) Salze über, die die erwähnten Ionenreaktionen gänzlich oder zum Teil verloren haben, die auch durchaus individuelle Absorptionsspektra zeigen und demnach Komplexverbindungen der Form $[Cr(H_2O)_{6-n}X_n]X_{3-n}$ oder von ähnlichem Typus darstellen. Ueber die Natur der grünen Verbindungen ist man nur in wenigen Fällen genau unterrichtet. — Die freiwillig in Lösung verlaufende Umwandlung: violett $\rightleftharpoons$ grün erfolgt bei gewöhnlicher Temperatur langsam; ihre Geschwindigkeit nimmt mit steigender Temperatur stark zu; sie führt in allen Fällen zu einem echten, von beiden Seiten erreichbaren Gleichgewicht zwischen violettem Salz und einem oder mehreren grünen Umwandlungsprodukten, dessen Lage mit steigender Temperatur sich stets zugunsten der letzteren verschiebt, so daß diese bei 100° etwa völlig dominieren, während in kalten verdünnten Lösungen die violetten Formen herrschen. Geschwindigkeit der Umwandlung und Lage des Gleichgewichtes sind in hohem Maße von dem Komplexbildungsvermögen des Anions abhängig, das z. B. für NO_3' sehr gering, für SO_4'' schon sehr erheblich ist. Diese Umwandlungserscheinungen der Lösungen (und Schmelzen) sind auch von Einfluß auf deren heterogene Gleichgewichte (vgl. den Artikel „Phasenlehre") mit festen Chromisalzen so zwar, daß das unäre System „Chromisalz" sich wie ein binäres oder das binäre System „Chromisalz-Wasser" sich wie ein ternäres verhält.

Bedingt wird die Erhöhung des Freiheitsgrades durch das Auftreten der „Zeit" als neuer, sonst nicht berücksichtigter, unabhängiger Variablen. Zum Ausdruck kommt diese Erscheinung z. B. darin, daß eine Chromisalzlösung bestimmter Konzentration ganz verschiedene Gefrierpunkte zeigen kann je nach dem Zustand, den das Chromisalz durch die Vorbehandlung angenommen hat.

Die Chromisalze zeigen ganz allgemein Giftwirkung, aber erheblich schwächer als die Chromate.

11b) Spezielle Chemie der Chromisalze. Chromifluoride. Das Anhydrid CrF_3 bildet grüne Kristalle; außerdem kennt man die violetten Hydrate $[Cr(H_2O)_6]F_3$ und $[Cr(H_2O)_6]F_3 . 3H_2O$, ein grünes Hydrat $[Cr(H_2O)_3 . F_3]_2 . H_2O$, das mit diesem polymere grüne $[Cr(H_2O)_6]CrF_6 . H_2O$ und schließlich $[Cr(H_2O)_6]CrF_6$. Fluoriddoppelsalze existieren hauptsächlich vom Typus $R_2'CrF_5$ und $R_3'CrF_6$.

Chromichloride. Das Anhydrid, $CrCl_3$, Chromchlorid, wird dargestellt aus Metall oder einem Oxyd-Kohlegemisch und Chlor oder aus Oxyd durch einen S_2Cl_2-Chlorstrom unter Erhitzung. Violette glimmerartige Blättchen, d_4^{15} 2,757; Dampfdichte bei 1200° normal. Sehr beständig gegen Säuren. Löst sich in Wasser (auch beim Kochen) nicht ohne weiteres, wohl aber leicht bei Zusatz sehr geringer Mengen Chromosalze oder anderer Reduktionsmittel zu einer grünen Flüssigkeit.

Die Hydrate des Chromichlorides gehören wegen ihrer Isomerie- und Umwandlungserscheinungen zu den interessantesten Stoffen der anorganischen Chemie. Bekannt sind 3 isomere 6-Hydrate (violett, hellgrün, dunkelgrün), ein 4- und ein 10-Hydrat bei allen ist die Konstitution genau bestimmt; sie sind das Fundament der Chemie der Chromisalze. 1. Violettes (graublaues) 6-Hydrat $[Cr(H_2O)_6]Cl_3$ (iso-

mer mit 2 und 3) erhält man durch Einleiten von HCl in eine Chrominitratlösung, welche das Ion $[Cr(OH_2)_6]^{\cdots}$ in großer Konzentration enthält. Monoklin, gibt mit Wasser eine blaue Lösung, deren Gefrierpunkte zu Molekulargewichten 60 bis 81 (je nach Konzentration) führen ($CrCl_3$ = 158,5); das molare elektrische Leitvermögen einer 0,01 molaren Lösung bei 25° ist $\mu_{25} = 343$ (reciproke Ohm). Alles Chlor wird durch Ag· sofort gefällt. 2. Hellgrünes 6-Hydrat (isomer mit 1 und 3) $[CrCl(H_2O)_5]^{\cdot\cdot}Cl_2.H_2O$ entsteht unter engbegrenzten Versuchsbedingungen. Mikrokristallin, sehr hygroskopisch. Gibt blaugrüne Lösungen mit μ_{25} (für 0,01 mol.) = 208,5. Ag· fällt daraus nur $^2/_3$ des Chlors sofort. — 3. Dunkelgrünes 6-Hydrat $[CrCl_2(H_2O)_4]^{\cdot}Cl.2H_2O$ (isomer mit 1 und 2). Zur Darstellung werden 100g CrO_3 in 750 ccm konzentrierter Salzsäure gelöst und 2 bis 3 Stunden gekocht; dann dampft man stark ein und kristallisiert das Produkt aus Wasser um. Rhombisch, hygroskopisch: gibt eine grüne Lösung, deren μ_{25} (0,01 mol.) 97,9 ist. Ag· fällt nur $^1/_3$ des Chlors sofort. Konstitutionell übereinstimmend mit 3 sind dunkelgrünes 4-Hydrat $[CrCl_2(H_2O)_4]Cl$ und dunkelgrünes 10-Hydrat $[CrCl_2(H_2O)_4]Cl.6H_2O$. In den frischen Lösungen jedes dieser Hydrate treten freiwillig Umwandlungen ein, die zu einem Gleichgewicht:

$$[Cr(H_2O)_6]^{\cdots} + 3Cl' \rightleftharpoons [Cr(H_2O)_5Cl]^{\cdot\cdot} + 2Cl' \rightleftharpoons [Cr(H_2O)_4Cl_2]^{\cdot} + Cl'$$

führen, das sich mit zunehmender Konzentration und Temperatur sowie durch Cl'-Ionen nach rechts verschiebt.

	Violettes	Hellgrünes Salz	Dunkelgrünes
	%	%	%
Bei 25° enthält 1,06-mol. Lösung	85	13	2
Bei 25° enthält 0,01 mol. Lösung	99,7	0,25	—
Bei Siedetemp. enthält Lsg. von 1 $CrCl_3.6H_2O$ in 1 Teil Wasser . . .	20	57	23

Natürlich ist es hierbei gleichgültig, von welchem Hydrat man ausging. Das Gleichgewicht wird um so schneller erreicht, je höher die Temperatur, je geringer die Konzentration ist. In verdünnten Lösungen von $[CrCl_2(H_2O)_4]Cl$ verläuft die — praktisch vollständige — Umwandlung als Reaktion erster Ordnung mit Folgereaktion erster Ordnung, entsprechend dem angegebenen Schema. — Vom Chromichlorid leiten sich zahlreiche Doppelsalze ab, deren wichtigste Typen $CrCl_3.2MCl.H_2O$ (rot) und $CrCl_3.2MCl.4H_2O$ (grün) sind.

Chromibromide. Das schwärzlichrote Anhydrid $CrBr_3$, das violette 6-Hydrat $[Cr(H_2O)_6]Br_3$ und das diesem isomere grüne $[CrBr_2(H_2O)_4]Br.2H_2O$ sind strenge Analoga der Chlorverbindungen, doch weniger beständig.

Chromijodide. Bekannt ist das Anhydrid CrJ_3 (dunkelrot) und ein violettes $CrJ_3.9H_2O$.

Chromihydroxyd, $Cr(OH_3)$, Chromhydroxyd, wird alkalifrei erhalten durch Fällung von Chromisalzösungen mit Ammoniak. Es ist ein hellblaugraues in Säuren (und kalten Alkalihydroxyden) lösliches Kolloid von sehr wechselndem Wassergehalt, dessen Reaktionsfähigkeit mit dem Alter sehr abnimmt. Vielleicht existiert es in verschiedenen Formen.

Chromioxyd, Cr_2O_3, Chromoxyd, erhält man amorph durch Glühen von $Cr(OH)_3$, CrO_3, $(NH_4)CrO_4$, $HgCrO_4$, kristallisiert durch Glühen eines Gemisches von $K_2Cr_2O_7$ + NaCl; das amorphe Cr_2O_3 ist lebhaft grün, das kristallisierte schwarz mit grünem Pulver. Hexagonal rhomboedrisch; d = 6,2; sehr hart. Das hoch geglühte Produkt ist unlöslich in Säuren. Entsprechend der schwach basischen Natur von Cr_2O_3 bildet es außer mit Säuren auch mit Alkalien Salze, die Chromite; diese entstehen aus gemischten Metallsalz-Chromisalzlösungen durch Alkalien in amorpher, durch Verschmelzen von Cr_2O_3 mit Metalloxyd in kristallisierter Form. Sie sind meist nach der Formel $R''O.Cr_2O_3$ zusammengesetzt, doch kommen auch andere Typen vor.

Chromisulfid, Cr_2S_3, Chromsulfid, entsteht durch Einwirkung von H_2S oder CS_2 auf verschiedene Chromiverbindungen bei hoher Temperatur. Grüne oder schwarze Blättchen, gegen Säuren sehr beständig; verbindet sich mit Metallsulfiden zu Sulfochromiten — aber nur auf trockenem Wege — z. B. $K_2Cr_2S_4$.

Chromiselenid, Cr_2Se_3, aus $CrCl_3$ + H_2Se, schwarz, bildet Selenochromite.

Chrominitrid, CrN, entsteht aus Metall und Stickstoff oder aus $CrCl_3$ und NH_3 bei hohen Temperaturen; schwarzes Pulver, sehr widerstandsfähig.

Chromiphosphid, CrP, graue Kristalle.

Chromicarbide entstehen im elektrischen Ofen aus Chromoxyd und Kohle; bekannt sind Cr_3C_2 und Cr_4C.

Chromisilicide bilden sich durch Schmelzen von Kupfersilicid mit Chrom; es wurden beschrieben Cr_3Si, Cr_2Si, Cr_3Si_2, $CrSi_2$.

Chromisulfit ist nur in mehreren basischen Salzen bekannt; Alkalisulfite verhindern die $Cr^{\cdots}$-Reaktionen.

Chromisulfate. Normales violettes Salz $[Cr_2(H_2O)_{12}](SO_4)_3.5H_2O$ erhält man durch konzentrierte H_2SO_4 aus konzentrierter Chrominitratlösung als Kristallpulver, das leicht in Wasser löslich ist. Durch Erhitzen auf 100° entstehen daraus grüne komplexe Sulfate mit 5 bis 8 Molen Wasser von unbekannter Konstitution, deren Lösung weder $Cr^{\cdots}$- noch SO_4''-Reaktion zeigt; diese Produkte oder ähnliche sind auch in den grünen „modifizierten" Lösungen enthalten, die durch Erhitzen der violetten Sulfatlösung entstehen. Die Umwandlungen erfolgen langsam; über die Gleichgewichte der Lösungen ist wenig bekannt. — Von sauren Sulfaten sind zu erwähnen die violetten Salze $Cr_2(SO_4)_3.H_2SO_4.16H_2O$ (oder $24H_2O$) und $Cr_2(SO_4)_3.2H_2SO_4.18H_2O$; von diesem existiert auch ein grünes Isomeres; außerdem sind noch stark komplexe „Chromisulfatschwefelsäuren" bekannt. — Von den zahlreichen Doppelsalzen sind die wichtigsten die Chromialaune $\left[Cr\genfrac{}{}{0pt}{}{(SO_4)_2}{(H_2O)_{12}}\right]R^{\cdot}$, (R=K, Na, Rb, Cs, Tl, NH_4, NH_3OH), die sich direkt aus den Lösungen der Komponenten abscheiden; alle bilden dunkelrotviolette reguläre Oktaeder, isomorph mit den Al- und Fe-Alaunen. Durch Entwässerung gehen sie in grüne Komplexverbindungen über.

Chrominitrat, $Cr(NO_3)_3.9H_2O$, das aus einer Lösung von $Cr(OH)_3$ in Salpetersäure kristallisiert, ist nur in violetter Form bekannt; auch die Lösung färbt sich nur vorübergehend in der Wärme grün; dies bedingt, daß das Nitrat das beste Ausgangsmaterial für alle violetten Salze ist.

Chromiphosphate. Violettes Orthophosphat, $CrPO_4.6H_2O$, entsteht aus Na_2HPO_4 und überschüssiger Chromalaunlösung in triklinen Kristallen. Es sind noch mehrere grüne Hydrate sowie Pyro- und Metaphosphate bekannt.

Chromicyanide. Chromicyanid, ein amorpher Niederschlag, vereinigt sich mit Metallcyaniden zu den ziemlich beständigen komplexen Metall-Chromicyaniden $[Cr(CN)_6]R^{\cdot}_3$, die mit Ferricyaniden große Aehnlichkeit haben. Die Salze sind meist gelb, zum Teil löslich, zum Teil unlöslich. Ihren Lösungen fehlen alle Reaktionen der normalen Chromisalze vollständig.

Chromirhodanide. Durch Lösen von $Cr(OH)_3$ in Rhodanwasserstoffsäure entsteht $Cr(SCN)_3$, das sich mit Metallrhodaniden zu roten komplexen Metall-Chromirhodaniden $[Cr(SCN)_6]R^{\cdot}_3$ vereinigt. Diese sind weniger stabil als die Cyanide, indem ihre roten, von $Cr^{\cdots}$ freien Lösungen allmählich zerfallen, wobei die Lösung grün wird.

Chromisalze organischer Säuren. Fettsäuren bilden mit Cr^{III} einerseits normale Salze $[Cr(H_2O)_6]R_3$ (R = Fettsäurerest), andererseits Komplexe der Typen $[Cr_3R_6(OH)_2]^{\cdot}X$, $[Cr_3R_6(H_2O)(OH)]^{\cdot\cdot}X_2$ und $[Cr_3R_6(H_2O)_2]^{\cdots}X_3$, in denen Cr sowie die Fettsäuren ihre Ionenreaktion verloren haben, und die (OH)-Gruppen nicht salzbildend wirken. In ähnlicher Weise gibt auch Oxalsäure ein kristallisiertes schwerlösliches normales violettes Oxalat, $Cr_2(C_2O_4)_3.25H_2O$, ein rotes, nicht kristallisiertes komplexes Oxalat und drei Reihen komplexe Metall-Chromioxalate, die blauen $[Cr(C_2O_4)_3]R_3.aq$, die grünen $[Cr(OH)(C_2O_4)_2]R_2.aq$ und die roten $Cr(C_2O_4)(C_2O_4R)$ aq, von denen sehr viele Salze dargestellt sind.

12. Chromiammine. Cr^{III} vereinigt sich mit NH_3 und substituierten Aminen (Pyridin, Aethylendiamin, Harnstoff usw.) zu Komplexen, die denen des Co^{III}, Rh^{III}, Pt^{IV} ganz analog sind. Die Theorie dieser Verbindungen ist im Artikel „Valenzlehre" entwickelt. Chrom hat die Koordinationszahl 6, die Haupttypen der Ammine sind demnach, wenn X ein einwertiges Amin, R ein einwertiger Säurerest, M· ein einwertiges Kation ist, folgende

$$[Cr.X_6]R_3,\quad \left[Cr\genfrac{}{}{0pt}{}{R}{X_5}\right]R_2,\quad \left[Cr\genfrac{}{}{0pt}{}{R_2}{X_4}\right]R,\quad \left[Cr\genfrac{}{}{0pt}{}{R_3}{X_3}\right],$$

$$\left[Cr\genfrac{}{}{0pt}{}{R_4}{X_2}\right]M^{\cdot},\quad \left[Cr\genfrac{}{}{0pt}{}{R_5}{X}\right]M^{\cdot}_2,\quad [CrR_6]M^{\cdot}_3.$$

Diese Reihe läßt den Uebergang von den komplexen Chromiamminen zu den Doppelsalzen erkennen. Dadurch, daß das Amin zum Teil durch H_2O ersetzt werden kann, und daß verschiedene Säurereste (einschließlich OH) am Aufbau dieser Stoffe sich beteiligen, werden jedem dieser Haupttypen eine große Zahl Nebentypen beigeordnet. Damit ist jedoch die Mannigfaltigkeit noch durchaus nicht erschöpft, denn außer diesen „einkernigen" Chromiamminen sind auch noch ziemlich viele „mehrkernige" bekannt, deren Konstitution aber noch nicht hinreichend aufgeklärt ist.

Die Chromiammine bilden sich durch Einwirkung von Ammoniak, Aminen oder deren Salzen auf Chromisalze oder aus ammoniakalischen, ammoniumsalzhaltigen Chromosalzlösungen durch Oxydation mit Sauerstoff (Luft). Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Chromiammine weisen sehr große Verschiedenheiten auf; alle Farben, alle Grade der Löslichkeit und Stabilität sind vertreten und ebenso kommen alle Stufen der Komplexität vor, von den stark komplexen $[CrX_6]^{\cdots}$ mit Alkalicharakter bis zu den wasserreichen Verbindungen, die schon den normalen Chromisalzen sehr ähneln.

Besondere Beachtung verdienen die Isomerieverhältnisse dieser Verbindungen: es finden sich nicht nur zahlreiche Polymerien

und Strukturisomerien, sondern auch vielfach Stereoisomere, wie sie die Theorie z. B. bei den Reihen $[Cr(NH_3)_4X_2]X$ voraussieht. Außerdem aber ist es neuerdings geglückt, die Verbindungen des Komplexes $[Cl_2Cr\,en_2]^{\cdot}$ (en = Aethylendiamin) in zwei optische Antipoden zu zerlegen, womit die Existenz des „unsymmetrischen Chromatoms" bewiesen ist und die Theorie dieser Verbindungen eine sehr starke Stütze erhalten hat.

Von den hunderten Chromiamminen können hier nur wenige charakteristische Gruppen erwähnt werden.

$[CrX_6]R_3$ (X = NH_3, Aethylendiamin (= en); R = Säurerest) Luteosalze; gelb mit löslichem Hydroxyd von Alkalicharakter.

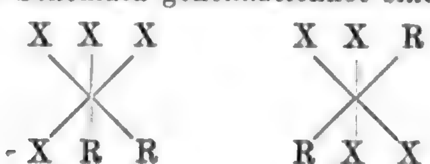
$[Cr{(NH_3)_5 \atop H_2O}]R_3$, Roseosalze, gelborange, den Luteosalzen sehr ähnlich.

$[Cr{(NH_3)_5 \atop R}]R_2$(R = Cl, Br, J) Purpureosalze, carmin-violettrot, wenig löslich; (R = NO_2) Xanthosalze, gelb.

$\left[Cr {(NH_3)_4 \atop {H_2O \atop R}}\right]\cdot R_2$.(R = Cl, Br, J, OH) violettrot, leicht löslich, ziemlich zersetzlich.

$\left[Cr{X_4 \atop R_2}\right]R$ (R = Cl, Br, CNS $(C_2O_4)^1/_2$; X = NH_3, $en^1/_2$).

Besonders interessant ist diese Gruppe dadurch, daß ihre Glieder in zwei stereoisomeren Formen auftreten, die durch folgende Schemata gekennzeichnet sind:



cis-Form trans-Form;

in diesen Bildern bezeichnen die Striche Oktaederachsen. Cis- und Trans-Form sind stets durch die Farbe unterschieden, z. B. ist cis- $[Br_2Cr\,en_2]Br$ violett, die Trans-Form aber grün.

$[CrR_4X_2]M$ (R = SCN, $(C_2O_4)_{1/2}$). Dies sind komplexe Anionen.

$[Cr_2X_8(OH)_2]R_4$, Diol-2-Chromisalze, blauviolett

$[Cr_2(NH_3)_{10}OH]R_5$, Rhodo- und Erythro-Chromisalze (Isomere).

$[Cr_2H_2O(OH)_3X_4]R_3$.aq, Rhodoso-Chromisalze.

13. Verbindungen des sechswertigen Chroms; Chromtrioxyd und die Chromate. 13a) Allgemeines. Die Ueberführung von Cr oder Cr^{II} und Cr^{III}-Verbindungen in solche des Cr^{VI} kann rein chemisch und elektrochemisch erfolgen. Bereits erwähnt wurde (Abschnitt 3) die Chromatbildung beim Schmelzen mit Basen (NaOH, Na_2CO_3, CaO) und Oxydationsmitteln (KNO_3, $KClO_3$, O_2), die technisch und analytisch wichtig ist. In alkalischen Lösungen (oder Suspensionen) gelingt die Oxydation zu Chromat leicht durch Cl, Br, H_2O_2 usw.; in saurer Lösung führen nur sehr starke Oxydationsmittel schnell und vollständig zum Ziel, z. B. Persulfate in Schwefelsäure oder Chlorate in konzentrierten Säuren. Die elektrolytische Oxydation an der Anode erfolgt ganz analog in alkalischen Lösungen sehr leicht, aber auch in sauren Lösungen ist sie gut durchführbar, besonders an PbO_2-Anoden.

Die Muttersubstanz aller Verbindungen des Cr^{VI} ist Chromtrioxyd, CrO_3, eine starke Säure, die der Schwefelsäure sehr ähnlich ist, aber auffälligerweise nicht in wasserhaltiger Form im festen Zustand auftritt. Ihre normalen Salze, die Chromate R'_2CrO_4, die aus neutralen oder alkalischen Lösungen auskristallisieren, sind meist gelb und vielfach isomorph mit den Sulfaten usw.; stark löslich sind die Chromate der Alkalimetalle, Ca, Mg; alle anderen sind wenig löslich und leicht durch doppelte Umsetzung zu erhalten. Merkwürdigerweise existieren keine sauren Salze der zweibasischen Chromsäure, dafür treten — ähnlich wie bei MoO_3 und WO_3 — die Polychromate auf, deren Zusammensetzung $R'_2Cr_2O_7$ (Bichromate), $R'_2Cr_3O_{10}$ (Trichromate), $R'_2Cr_4O_{13}$ (Tetrachromate) ist. Diese können sich direkt aus M'_2CrO_4 und CrO_3 bilden und sind in angesäuerten — mit CrO_3 versetzten — Chromatlösungen enthalten, aus denen sie sich bei hinreichender Konzentration fest abscheiden, wobei jedem Salz ein bestimmtes Aciditätsintervall entspricht (siehe Kaliumchromate). Die Polychromate sind gelbrot bis tiefrot gefärbt und mehr oder weniger stark löslich. Mono- und Bichromate sind durchweg sehr stabile Verbindungen. Die Lösungen der ersteren sind rein gelb, die der letzteren (und des freien CrO_3) rotgelb gefärbt; sie absorbieren den kurzwelligen Teil des Spektrums, etwa von Grün an, doch ohne charakteristisches Absorptionsspektrum. Neutrale Chromate liefern in Lösung hauptsächlich das Ion CrO_4'', sind aber etwas hydrolytisch gespalten. Bichromat- und CrO_3-Lösungen enthalten hauptsächlich das Ion Cr_2O_7'', das einer ziemlich starken Säure $H_2Cr_2O_7$ entspricht. Daneben treten aber auch noch die Ionen $HCrO_4'$ und CrO_4'' auf. Zwischen den verschiedenen nicht dissoziierten Molekeln und den erwähnten Ionengattungen stellen sich momentane Gleichgewichte ein, die von Zusammensetzung (Verhältnis $R_2O:CrO_3$) Konzentration und Temperatur abhängen. Die Molekelarten $R_2Cr_3O_{10}$ und $R_2Cr_4O_{13}$ und ihre Ionen sind nur in sehr konzentrierten Lösungen vorhanden. Charakteristische Unterscheidungsreaktionen der verschiedenen Ionen-

arten sind nicht vorhanden: aus schwach sauren und neutralen Chromatlösungen fällt $Pb^{\cdot\cdot}$ gelbes $PbCrO_4$, $Ba^{\cdot\cdot}$ gelbes $BaCrO_4$, $Ag^{\cdot}$ dunkelrotes Ag_2CrO_4. Alle anderen chemischen Reaktionen der Chromatlösungen — die mit H_2O_2 ausgenommen (siehe 14) — sind Oxydationsreaktionen, die in saurer Lösung nach dem Schema $2CrO_3 = Cr_2O_3 + 3O$ oder $CrO_4'' + 8H^{\cdot} = Cr^{\cdot\cdot\cdot} + 4H_2O + 3\oplus$ verlaufen. Demnach ist das Oxydationspotential

$$\pi = \pi_0 + \frac{RT}{3} \ln \frac{[CrO_4''][H^{\cdot}]^8}{[Cr^{\cdot\cdot\cdot}]},$$

worin π_0, das Normalpotential (für $[CrO_4''] = [Cr^{\cdot\cdot\cdot}]$ und $H^{\cdot}=1$) ungefähr den Wert $+1,3$ besitzt. Diese Formel läßt erkennen, wie sehr die Acidität die Oxydationswirkung steigert, wie demnach umgekehrt in alkalischen Lösungen diese Größe vermindert wird. Hierdurch erklärt sich, daß der Uebergang $Cr^{III} \rightarrow Cr^{VI}$ viel leichter in alkalischen als in sauren Lösungen erfolgt und umgekehrt.

Chromate sind für niedere und höhere tierische und pflanzliche Organismen ziemlich starke Gifte.

13b) Spezielle Beschreibung von Cr^{VI}-Verbindungen.

Chromtrioxyd, Chromsäure, CrO_3 erhält man aus Chromatlösungen durch konzentrierte Schwefelsäure. Karminrote rhombische Nadeln, d = 2,8, schmilzt bei 196°; sehr hygroskopisch; 100 g H_2O lösen 166 g CrO_3 bei 15°, 207 g bei 99°. Zerfällt dicht oberhalb des Schmelzpunktes, wirkt stark oxydierend.

Kaliumchromate. Es sind nur die wasserfreien Salze bekannt.

Kaliummonochromat, K_2CrO_4, entsteht aus allen Lösungen, in denen $K_2O:CrO_3 > 1$, beim Konzentrieren. Zitronengelbe rhombisch-bipyramidale Kristalle, d = 2,74, Smp.: 980°; polymorph. 100 g H_2O lösen bei 20° etwa 63 g Salz. Die gelben Lösungen reagieren alkalisch.

Kaliumbichromat, $K_2Cr_2O_7$, scheidet sich beim Konzentrieren von Lösungen ab, in denen $K_2O:CrO_3$ zwischen 1 und 0,06 liegt; am günstigsten ist natürlich das Verhältnis 0,5. Das Salz ist polymorph; die gewöhnliche rote Form triklin: d = 2,7, Smp.: 395°. 100 g H_2O lösen bei 20° 12 g, bei 60 ° 46 g $K_2Cr_2O_7$. Die gelbrote Lösung reagiert sauer.

Kaliumtrichromat, $K_2Cr_3O_{10}$, aus Lösungen, deren Verhältnis $K_2O:CrO_3$ zwischen 0,06 und 0,048 liegt. Tiefrote monokline Prismen, luftbeständig, wird von Wasser zersetzt.

Kaliumtetrachromat, $K_2Cr_4O_{13}$, aus Lösungen mit einem Verhältnis $K_2O:CrO_3$ zwischen 0,047 und 0,01. Braunrote Täfelchen, wird durch Wasser zersetzt.

Natriumchromate sind jetzt die technisch wichtigsten Chromate, da sie billiger und löslicher als die Kaliumsalze sind, und relativ mehr CrO_3 enthalten.

Natriummonochromat, Na_2CrO_4, kristallisiert je nach der Temperatur als Anhydrid, oder 4-, 6- oder 10-Hydrat. Letzteres entsteht unter 20° und bildet zitronengelbe monokline Kristalle, das Anhydrid ist oberhalb 65° beständig, bei 19,6° lösen 100 g H_2O 79 g Na_2CrO_4.

Natriumbichromat, $Na_2Cr_2O_7$, ist als Anhydrid oder 2-Hydrat (unter 83°) bekannt; letzteres bildet rote sechsseitige Säulen. Das Anhydrid schmilzt bei 320°. Bei 20° lösen 100 g H_2O 180 g $Na_2Cr_2O_7$.

Natriumtrichromat, $Na_2Cr_3O_{10}.H_2O$, sehr zerfließlich; Tetrachromat $Na_2Cr_4O_{13}.4H_2O$. — Von Interesse ist noch ein basisches Natriumchromat, $Na_4CrO_5.13H_2O$, das aus stark alkalischen Lösungen entsteht.

Ammoniumchromate existieren in denselben Sättigungsstufen wie die Kaliumsalze; sie sind gleichfalls wasserfrei.

Ammoniummonochromat, $(NH_4)_2CrO_4$ — aus stark ammoniakalischer CrO_3-Lösung — bildet zitronengelbe monokline Nadeln, d = 1,9, bei 30° lösen 100 g H_2O 40,5 g Salz; geht sehr leicht — indem NH_3 entweicht — über in Ammoniumbichromat, $(NH_4)_2Cr_2O_7$, gelbrote monokline Kristalle, d = 2,1, von dem bei 30° 100 g H_2O 47,2 g lösen. Luftbeständig, verglimmt beim Erhitzen lebhaft, wobei Cr_2O_3 zurückbleibt. Ammoniumtrichromat- und Tetrachromat sind dunkelrote kristallisierte Stoffe, die durch Wasser zersetzt werden.

Magnesiumchromat, $MgCrO_4$, bildet ein 7-Hydrat (rhombisch) und ein 5-Hydrat (triklin); die Polychromate sind nicht bekannt.

Calciumchromate spielen eine wesentliche Rolle bei der technischen Verarbeitung der Chrommineralien. Monochromate erhält man aus Lösungen, die durch Absättigen von Chromsäure mit CaO entstehen. $CaCrO_4.2H_2O$ ist polymorph, monoklin und rhombisch; ersteres ist isomorph mit Gips ($CaSO_4.2H_2O$), letzteres ist die stabile Form. $CaCrO_4.1H_2O$ entsteht zwischen 30 und 70°, rhombisch. $CaCrO_4.0,5H_2O$ entsteht bei 100°, oktaedrische Kristalle. $CaCrO_4$ (Anhydrid) erhält man durch Entwässern der Hydrate. Die wechselseitigen Umwandlungen der Hydrate, von denen jedes eine besondere Löslichkeitslinie besitzt, verlaufen sehr träge. — Bichromat, $CaCr_2O_7.3H_2O$, sehr zerfließlich. — Tetrachromat, $CaCr_4O_{13}$.

— Basisches Chromat, $Ca_2CrO_5.3H_2O$, hellgelbe monokline Kristalle.

Strontiumchromate. Monochromat, $SrCrO_4$ fällt aus $Sr^{\cdot\cdot}$-Lösungen durch CrO_4'' aus, bisweilen in Prismen, bisweilen in Nadeln. Bichromat, $SrCr_2O_7.3H_2O$, rotbraune monokline Kristalle. Trichromat, $SrCr_3O_{10}.3H_2O$, granatrot, sehr zerfließlich.

Bariumchromate. Das sehr wenig lösliche Monochromat, $BaCrO_4$, fällt aus neutralen oder schwach sauren $Ba^{\cdot\cdot}$-Lösungen durch CrO_4'' aus. Blaßgelb, rhombisch, isomorph mit $BaSO_4$. Bichromat, $BaCr_2O_7.2H_2O$ entsteht aus einer Lösung von $BaCrO_4$ in Chromsäure; gelbbraune Nadeln.

Zinkchromate. Monochromat, $ZnCrO_4$, Prismen. Bichromat, $ZnCr_2O_7.3H_2O$ hygroskopische, leichtlösliche Kristalle.

Bleichromate sind wichtig als gelbe bis rote Farbstoffe. Welches von den später genannten Produkten sich aus Lösungen bildet, hängt von deren CrO_3 Konzentration ab. Monochromat, $PbCrO_4$ (Chromgelb) kommt natürlich als Rotbleierz vor; es kann auf trockenem Wege oder durch Fällen von $Pb^{\cdot\cdot}$-Lösungen mit CrO_4'' erhalten werden. Monklin, d = 6,2; bei 18° lösen 100 g H_2O $2,0 \times 10^{-5}$ g $PbCrO_4$. — Bichromat, $PbCr_2O_7$ wird von Wasser zersetzt. Basische Chromate: $2PbO.CrO_3$ ist „Chromrot". Seine Farbe wechselt nach der Herstellungsart. — $3PbO.CrO_3$ ist das Mineral Melanochroit.

Silberchromate. Das Monochromat, Ag_2CrO_4 tritt entweder rot und mikrokristallin oder grünschwarz kristallisiert auf; es bildet sich durch Doppelzersetzung. — Bichromat, $Ag_2Cr_2O_7$ entsteht aus heißer saurer $Ag^{\cdot}$-Lösung durch Cr_2O_7''. Dunkelrote durch H_2O zersetzbare Kristalle.

Quecksilber(Hg^{II})-Chromate. Monochromat, $HgCrO_4$, granatrote Prismen, wird durch Wasser in 3 $HgO.CrO_3$ verwandelt. Bichromat, $HgCr_2O_7$, karmoisinrote Kristalle.

Chromichromate sind die Produkte, die durch Fällung von $Cr^{\cdot\cdot\cdot}$ mit CrO_4'' oder durch partielle Reduktion von Chromaten entstehen; erwähnt seien $2Cr_2O_3.CrO_3 = Cr_5O_9$ und $Cr_2O_3.CrO_3 = 3CrO_2$.

Halogenhaltige Substitutionsprodukte der Chromsäure sind nur in geringer Zahl bekannt.

Chromylfluorid, CrO_2F_2, entsteht bei Destillation eines Gemisches von $K_2Cr_2O_7 + CaF_2$ mit Schwefelsäure; blutrote Flüssigkeit, die sich mit Wasser völlig zersetzt. Das Halbfluorid der Chromsäure, $CrO_2(OH)F$, ist nur in Form seiner Salze $F.CrO_2.OK$ und $F.CrO_2.ONH_4$ bekannt, die aus Chromaten und Flußsäure entstehen.

Chromylchlorid, CrO_2Cl_2, entsteht direkt aus CrO_3 und HCl (trocken oder in konzentrierter Lösung) oder bei Destillation von Chromat mit NaCl und rauchender Schwefelsäure; es ist eine tiefrote Flüssigkeit, $d^{25}/_{25}° = 1,92$ vom Siedepunkt 116°; wird von Wasser zersetzt; leicht löslich in organischen Flüssigkeiten; gewisse Kohlenwasserstoffe oxydiert es unter Bildung von Aldehyden und Ketonen (Etardsche Reaktion). Vom Halbchlorid der Chromsäure $Cl.CrO_2.OH$ existieren nur einige Salze, die Chlorchromate, die durch Einwirkung von HCl auf Chromate entstehen; sie zerfallen mit Wasser. $KO.CrO_2.Cl$, $NaO.CrO_2.Cl$, HN_4OCrO_2Cl usw. sind gelbrote Kristalle.

14. Perchromsäuren und Perchromate. Die Entstehung sauerstoffreicherer Chromverbindungen aus Chromaten und Wasserstoffperoxyd ist 1847 zuerst nachgewiesen worden. — Die Einwirkung von H_2O_2 auf Chromatlösungen ist in hohem Maße von der Temperatur und dem $H^{\cdot}$- oder OH'-Gehalt abhängig. Unter 0° wirkt H_2O_2 auf stark alkalische Chromatlösungen nicht merklich ein; mit abnehmendem OH'-Gehalt — z. B. in Monochromatlösungen — tritt eine rotbraune Färbung ein, die durch Bildung der roten Perchromate, R_3CrO_8, bedingt ist:

$$\text{(I)}\ 2CrO_4'' + 7H_2O_2 + 2OH' = 2CrO_8''' + 8H_2O.$$

Bei weiterer Verminderung der OH'-Konzentration — etwa in Bichromatlösungen — tritt Violettfärbung ein infolge Bildung der blauen Perchromate, $RCrO_6$ oder RH_2CrO_7:

$$\text{(II)}\ Cr_2O_7'' + 5H_2O_2 = 2H_2CrO_7' + 3H_2O$$
$$H_2CrO_7' = CrO_6' + H_2O;$$

doch existiert zwischen beiden Vorgängen keine scharfe Grenze, auch ist das Verhältnis $CrO_3 : H_2O_2$ von Einfluß (s. unten).

In Gegenwart reichlicher $H^{\cdot}$-Ionen tritt infolge Bildung freier Perchromsäuren intensive Blaufärbung ein, die in Aether übergeht (wichtige Reaktion auf Cr_2O_7'' und H_2O_2). Dies alles gilt nur für tiefe Temperaturen. Die Perchromate sind weder fest noch gelöst dauernd haltbar; sie zerfallen um so schneller, je höher die Temperatur ist und auch hierbei spielt die Reaktion der Lösung eine wichtige Rolle. In alkalischen Lösungen liefern sie unter Sauerstoffentwicklung wieder Chromat: $2CrO_8''' + H_2O = 2CrO_4'' + 2OH' + 7O$; in saurer Lösung dagegen tritt Zerfall in Chromisalz und Sauerstoff ein: $CrO_8''' + 6H^{\cdot} = Cr^{\cdot\cdot\cdot} + 5O + 3H_2O$. Natürlich existieren auch Gebiete, wo beide Zerfallreaktionen nebeneinander hergehen. Bei mittleren Temperaturen folgt demnach bei Einwirkung von H_2O_2 auf Chromate der Bildung der Perchromate

ihr Zerfall unmittelbar und daraus ergibt sich für alkalische Lösungen eine „katalytische" Zersetzung von H_2O_2 durch Chromatlösung, während in mehr oder weniger saurer Lösung durch H_2O_2 indirekt eine Reduktion der Chromate stattfindet, und zwar, wenn H_2O_2 überschüssig ist nach den Formeln

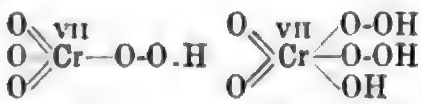
$$Cr_2O_7'' + 7H_2O_2 = 2CrO_8''' + 4H^{\cdot} + 5H_2O$$
$$\text{(III)}\ 2CrO_8''' + 12H^{\cdot} = 2Cr^{\cdots} + 6H_2O + 5O_2$$

wenn dagegen Cr_2O_7'' im Ueberschuß vorhanden ist, folgendermaßen:

$$Cr_2O_7'' + 3H_2O_2 = 2CrO_5' + 3H_2O$$
$$\text{(IV)}\ 2CrO_5' + 8H^{\cdot} = 2Cr^{\cdots} + 4H_2O + 3O_2.$$

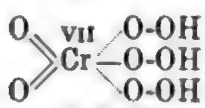
In keinem Falle entwickeln aber die Perchromate — etwa wie Permanganat — aus überschüssigem H_2O_2 Sauerstoff.

Während früher mehrfach die Ansicht ausgesprochen wurde, daß die Perchromate Wasserstoffperoxydverbindungen der Chromate wären, also Cr^{VI} enthielten, ist es jetzt wahrscheinlicher, daß sie sich von Cr^{VII} ableiten, außerdem aber noch die Gruppe —O—O ein- oder mehrfach enthalten. Ihre Konstitutionsformeln wären demnach folgende



$HCrO_5$ H_3CrO_7

Blaue Perchromate



H_3CrO_8

Rote Perchromate.

Die freien Perchromsäuren sind im festen Zustand nicht zu isolieren, wohl aber gelingt dies bei ihren Salzen.

Rote Perchromate, R_3CrO_8, entstehen aus gekühlten, mäßig alkalischen Chromatlösungen durch 30%ige H_2O_2-Lösung (Gleichung I). Es sind rote-gelbrote kristallisierte, relativ stabile Salze, die in alkalischer Lösung einigermaßen haltbar sind, in saurer aber unter Bildung von $Cr^{\cdots}$ zerfallen (Gl. III). Bekannt sind K_3CrO_8, $Na_3CrO_8 \cdot xH_2O$, $(NH_4)_3CrO_8$.

Blaue Perchromate existieren in zwei Typen: $RCrO_5$ und RH_2CrO_7; letztere können als $RCrO_5 + H_2O_2$ betrachtet werden. Sie bilden sich aus schwachsauren Chromatlösungen durch H_2O_2 (s. oben Gl. II) hierbei entsteht der Typus $RCrO_5$ mit organischen stickstoffhaltigen Basen, RH_2CrO_7 dagegen nur bei Gegenwart von NH_4OH oder KOH. Die Farbe dieser Stoffe ist indigo oder violett. Ihre Beständigkeit ist recht verschieden. Der Zerfall entspricht den obigen Angaben (Gl. IV). Vom Typus $RCrO_5$ sind bekannt die Salze mit Pyridin, Anilin, Chinolin, Tri- und Tetramethylammonium. Vom Typus RH_2CrO_7 kennt man $NH_4 \cdot H_2CrO_7$ und KH_2CrO_7.

15. Analytische Chemie. Die Ionenreaktionen der einzelnen Valenzstufen des Chroms sind bereits in den betreffenden Abschnitten mitgeteilt. Im Gange der qualitativen Analyse findet sich Chrom — auch wenn es ursprünglich als Chromat vorhanden war — in der „Schwefelammoniumgruppe". Zur Identifizierung führt man das Hydroxyd entweder mit der Na_2CO_3-KNO_3-Schmelze oder mit alkalischer Bromlösung in die gelbe Chromatlösung über, die nach Zusatz von Essigsäure mit $Pb^{\cdot\cdot}$ einen gelben Niederschlag gibt oder auch noch mit $H_2O_2 + H_2SO_4$ (Blaufärbung) weiter geprüft werden kann. Die quantitative Bestimmung erfolgt meist als Cr_2O_3; ist Chromat zu bestimmen, so kann man CrO_4'' mit $Hg_2^{\cdot\cdot}$ ausfällen und durch Verglühen Cr_2O_3 erhalten. Auch titrimetrisch läßt sich Chromat auf mehreren Wegen bestimmen.

Literatur. *Abegg, Handbuch der anorganischen Chemie.*

J. Koppel.

Molybdän und Wolfram.

Molybdän und Wolfram bilden innerhalb der Sauerstoffgruppe des periodischen Systems ein durch zahlreiche übereinstimmende Eigenschaften eng verbundenes Elementenpaar, das durch seinen ziemlich ausgeprägten Metalloidcharakter deutlich geschieden wird von den anderen Angehörigen derselben Familie, dem Chrom und dem Uran, mit ihren vornehmlich entwickelten metallischen Funktionen.

f) Molybdän.

Mo. Atomgewicht 96.0.

1. Atomgewicht. Als Atomgewicht des Molybdäns hat die Internationale Kommission für das Jahr 1913 den Wert 96,0 festgesetzt.

2. Vorkommen. Die wichtigsten Molybdänmineralien — gediegen kommt das Element nicht vor — sind der graphitähnliche Molybdänglanz (MoS_2) und das Gelbbleierz ($PbMoO_4$), zu deren bedeutendsten Fundorten die sächsischen und böhmischen Bergwerksreviere gehören.

3. Geschichte. 1778 stellte Scheele

aus dem bis dahin für Graphit gehaltenen Molybdänglanz die Molybdänsäure dar, aus der Hjelm 1782 das Metall isolierte. Ein genaueres Studium der komplizierten Chemie des Molybdäns datiert erst seit Berzelius. — Der Name des Elements geht auf μολύβδαινα Blei, zurück.

4. Darstellung und Verwendung. Am einfachsten gestaltet sich die Darstellung des Molybdäns und seiner Verbindungen aus dem Molybdänglanz (MoS_2), der beim Rösten an der Luft Molybdäntrioxyd (MoO_3) liefert, von dem aus die meisten Salze und das Metall selbst zugänglich sind. Man gewinnt es durch Reduktion von MoO_3 im Wasserstoffstrom oder aluminothermisch unter Zugabe von Flußspat als Schlackenbildner. Vorteilhaft verwendet man jedoch für das Goldschmidtverfahren statt des flüchtigen MoO_3 das glühbeständige MoO_2. — Aus dem Gelbbleierz scheidet man das Blei als schwerlösliches Chlorid oder Sulfat ab, führt die in Freiheit gesetzte Molybdänsäure in das Ammonsalz über und verglüht dieses zu MoO_3. Oder man schmilzt das Erz mit Weinstein und Schwefel und röstet das aus dem wässerigen Auszuge der Schmelze mit Schwefelsäure abgeschiedene Molybdäntrisulfid. Im großen anwendbar ist die Reduktion von MoS_2 mit Kalk und Flußspat im elektrischen Ofen, doch besteht kaum ein Bedarf für das reine Metall, vielmehr verwendet man es in einer Legierung mit ca. 50% Eisen zur Herstellung von wertvollen Spezialstählen, wenn auch seltener und weniger vorteilhaft als das billigere Wolfram (s. dieses).

5. Formarten. Molybdän ist ein graues Pulver oder ein silberglänzendes, sprödes Metall mit weißem Bruch, doch wird es in der Hitze dehn- und schmiedbar. Der Schmelzpunkt liegt bei 2250±50°, der Härtegrad bei 5,5 der Mohsschen Skala. Die Eigenschaften des Metalls werden durch geringe Verunreinigungen stark modifiziert. Kohlenstoff erniedrigt den Schmelzpunkt, während Eisen die Härte erhöht.

Die spezifische Wärme beträgt 0,058, für Temperaturen zwischen 16 und 100°, die Dichte 9.

6. Valenz und Elektrochemie. Von den Valenzstufen, in denen Molybdän sich zu betätigen scheint, ist nur die dritte und fünfte sicher bewiesen, diese aus der normalen Dampfdichte des Molybdän(V)chlorids ($MoCl_5$), jene aus der Isomorphie des Salzes $K_3[Mo(SCN)_6].4H_2O$ mit dem analogen, sicher dreiwertigen Chromsalze. Sehr zweifelhaft ist die Zweiwertigkeit. Auch für die Vierwertigkeit, für die das MoO_2 und $MoCl_4$ spräche, sind keine Beweise vorhanden, denn das Salz $K_4[Mo(CN)_8].2H_2O$, dem der Formel entsprechend vierwertiges Molybdän zugrunde liegen müßte, leitet sich seinem analytischen Verhalten nach unerklärlicherweise vom fünfwertigen Molybdän ab. Trotz dem Mangel an Messungen kann man dagegen die Sechswertigkeit im MoF_6 und somit auch im MoO_3 als fraglos ansehen, während in den Permolybdaten vom Typus $XMoO_4.2H_2O$ siebenwertiges Molybdän vorliegen dürfte.

Ueber die Ionen des Molybdäns ist fast nichts bekannt, da die einfachen Salze durch Wasser hydrolytisch zersetzt werden. Die Neigung, für sich in den ionisierten Zustand überzugehen, ist beim Molybdän offenbar nur ganz gering, um so ausgeprägter aber, wie immer bei derart schwach elektroaffinen Metallen, die Fähigkeit, Ionenkomplexe zu bilden. Während komplexe Molybdänkationen, wie das des Dichlorids $[Mo_3Cl_4]^{\cdot\cdot}$, ganz vereinzelt dastehen, sind Anionenkomplexe in großer Mannigfaltigkeit bekannt. Von dem durchaus beständigen, gut bekannten, zweiwertigen Molybdation MoO_4'' leiten sich die normalen Molybdate ab vom Typus X_2MoO_4, aber auch die Isopolymolybdate, deren Anionen durch Anlagerung von MoO_3 in wechselnden Zahlenverhältnissen an dieses Ion selbst oder an ein ganzzahliges Multiplum desselben entstehen nach Maßgabe des Schemas $nMoO_4.mMoO_3$. Die Wertigkeit dieser Ionen ist gleich 2 n. Ist n konstant gleich 1, so gelangt man mit steigendem Werte von m zu folgenden wichtigeren Molybdationen: Mo_2O_7'' Dimolybdation (m = 1), Mo_3O_{10}'' Trimolybdation (m = 2), Mo_4O_{13} Tetramolybdation (m = 3), Mo_8O_{26}'' Oktomolybdation (m=7); ist n=5 und m=7, so erhält man das Paramolybdation $Mo_{12}O_{41}^{x}$. Im allgemeinen steigt mit der Größe des Komplexes auch die Fähigkeit zur Salzbildung mit schwachen Basen, so daß z. B. $(NH_4)_2MoO_4$ sehr zersetzlich, $(NH_4)_{10}Mo_{12}O_{41}$ dagegen durchaus beständig ist.

Eine besondere Bedeutung als Komplexbildner gewinnt das Molybdän durch die Fähigkeit, sich in Form von Molybdat- bezw. Dimolybdatresten (MoO_4 bezw. Mo_2O_7) in das Anion anderer Säuren einzulagern. Aus der großen Zahl der so entstehenden Verbindungen verdienen eingehendere Beachtung die Heteropolysäuren, deren Konstitution nach Werner und Miolati durch folgendes Schema darstellbar ist: $H_{12-n}[R^n(Mo_2O_7)_6].28$ (bezw. 22) H_2O und $H_{20-2n}[R_2^n(Mo_2O_7)_9(OH)_2].xH_2O$. wo R eines der Elemente J, Te, P, As, Si, Ti, Zr, B, Al, Cr, Fe und n deren maximale Wertigkeit ist. Die Säuren vom ersten Typus sind gesättigte Grenzverbindungen, die anderen dagegen sind ungesättigt und im allgemeinen auch weniger beständig.

Auf einer ähnlichen Komplexbildung beruht wahrscheinlich die Fähigkeit der Molybdate, das Drehungsvermögen optisch aktiver organischer Oxysäuren stark zu erhöhen.

Auch komplexe Halogenide, Rhodanide und Cyanide sind bekannt; sie lassen sich unter die allgemeine Formel $R_m[MoP_nX_q]$ subsumieren, wo p die Wertigkeit, n und q—p = 1, 2, 3 . . ., m = q—np und das Halogen paarweise durch Sauerstoff ersetzbar ist. Sie haben zum Teil Doppelsalzcharakter.

7. Analytische Chemie. a) Qualitative Analyse. α) Auf trockenem Wege. Molybdänverbindungen erteilen in der Oxydationsflamme der Boraxperle eine gelbe bis rote, der Phosphorsalzperle eine gelbgrüne Färbung, die beim Abkühlen verschwindet. In der Reduktionsflamme wird die Phosphorsalzperle grün, die Boraxperle braun. Kohle reduziert in der Sodaschmelze zu Metall und blauen Oxyden.

β) Auf nassem Wege. Da sich alle Molybdänsalze, auch die der Komplexsäuren, eventuell nach vorgängiger Oxydation mit Salpetersäure, durch Alkalien in neutrale Molybdate überführen lassen, so kommt für die Analyse der Molybdänverbindungen nur das Verhalten des MoO_4''-Ions in Betracht.

Während verdünnte Säuren nur aus konzentrierten Molybdatlösungen weiße H_2MoO_4 fällen, gibt konzentrierte Schwefelsäure beim Eindampfen schon mit Spuren von Molybdän eine charakteristische, intensive Blaufärbung.

Schwefelwasserstoff gibt — unter vorübergehender Blaufärbung der Lösung infolge von Reduktion — schließlich einen braunen Niederschlag von MoS_3, löslich in Schwefelammon mit tiefroter Farbe.

Reduktionsmittel, wie Zink und Salzsäure, Zinnchlorür, reduzieren zu braunem MoO_2, wobei die Lösung intermediär eine blaue, dann grüne Farbe annimmt; bei Zusatz von Rhodankalium geht die braune Farbe des Reduktionsproduktes in eine blutrote über, ähnlich der des Eisen-(III)-rhodanids, und wie dieses mit Aether ausschüttelbar, jedoch dadurch von ihm unterschieden, daß die Färbung bei Zusatz von Phosphorsäure bestehen bleibt.

Dinatriumphosphat gibt in stark salpetersaurer Lösung den charakteristischen, gelben Niederschlag von Ammoniumphosphormolybdat.

Weitere empfindliche Reagentien sind Blei- und Quecksilber(-I-)salze (weiße Fällungen), Ferrocyankalium (braune Fällung) und Kaliumxanthogenat (gelber, in violett übergehender Niederschlag, in großer Verdünnung Rosafärbung, sehr empfindlich).

b) Quantitative Analyse. Quantitativ bestimmt man das Molybdän bei Abwesenheit von Chloriden durch Fällung mit Merkuronitrat, am besten aus schwach alkalischer Lösung, und Verglühen des Merkuromolybdates zu MoO_3.

Bei Gegenwart von Chlorion scheidet man es als Sulfid ab, und zwar aus saurer Lösung mit Schwefelwasserstoff als MoS_3, aus alkalischer mit Schwefelammon als Sulfomolybdat, aus dem man das MoS_3 durch verdünnte Schwefelsäure in Freiheit setzt. Durch vorsichtiges Rösten führt man das MoS_3 in MoO_3 über.

8. Spezielle Chemie. 8a) Verhalten des Molybdänmetalls. Molybdän ist bei gewöhnlicher Temperatur atmosphärischen Einflüssen gegenüber recht widerstandsfähig, wird aber in der Hitze leicht durch den Sauerstoff der Luft oxydiert. Fluor, Chlor und Brom bilden je nach der Temperatur verschiedene Halogenide, während Wasserstoff und Stickstoff nicht absorbiert werden. In Salpetersäure löst es sich leicht zu MoO_3, durch Schwefelsäure wird es in MoO_2 und nur schwierig in höhere Oxyde übergeführt. Flußsäure wirkt nur ganz schwach ein, die übrigen Halogenwasserstoffsäuren greifen dagegen ebensowenig an wie Alkalien.

8b) Einfache Verbindungen. α) Des vermeintlich zweiwertigen Molybdäns. — Molybdändichlorid, $MoCl_2$, wird als amorphes gelbes Pulver durch mäßiges Erhitzen von $MoCl_3$ in einer Kohlensäureatmosphäre erhalten. Es ist unlöslich in Wasser, löslich in 96-prozentigem Alkohol und dissoziiert darin, nach seinem Verhalten bei der Elektrolyse, in Mo_3Cl_4'' und $2Cl'$. Zu der hiernach anzunehmenden dreifachen Molekulargröße paßt die Dampfdichtebestimmung, die den Wert 513 statt des berechneten 501 ergab. $MoCl_2$ bildet verschiedene Hydrate.

Molybdändibromid, $MoBr_2$, ein gelbrotes Pulver, entsteht beim Glühen von $MoBr_3$ und ist dem $MoCl_2$ ganz analog.

Molybdändijodid, MoJ_2, wird erhalten durch Reduktion von $MoCl_5$ mit Jodwasserstoff als braunes Pulver.

Molybdännitrid, Mo_3N_2, bildet sich bei 760° aus $MoCl_3$ und NH_3 als metallglänzendes Pulver.

β) Des dreiwertigen Molybdäns. Molybdän(III)chlorid, $MoCl_3$, wird dargestellt durch Erhitzen von $MoCl_5$ im Kohlensäurestrom. Dunkelrote Kristalle, wasserunlöslich. Auch die elektrolytische Reduktion salzsaurer Trioxydlösungen führt zu dreiwertigen Molybdänverbindungen, von denen mehrere Alkalidoppelchloride isoliert worden sind (siehe ε).

Molybdän(III)bromid, $MoBr_3$, ent-

steht in Form feiner, schwarzer Nadeln aus den Elementen bei mäßiger Hitze.

Molybdän(III)oxyd, M_2O_3, entsteht bei der Elektrolyse einer neutralen Ammonmolybdatlösung als graues Pulver ohne basische Eigenschaften. Das entsprechende Sulfid, Mo_2S_3, entsteht aus MoS_2 durch Glühen im elektrischen Ofen.

γ) Des vermutlich vierwertigen Molybdäns.

Molybdäntetrachlorid, $MoCl_4$, erhält man beim Erhitzen von $MoCl_3$ in einem langsamen Kohlensäurestrom. Braune sublimierbare Kristallmasse. Zersetzt sich mit Wasser.

Molybdändioxyd, MoO_2, bildet sich aus MoO_3 bei vorsichtiger Reduktion im Wasserstoffstrom. Dunkelblauviolette Prismen. MoO_2 ist auch das Endprodukt der Reduktion von Molybdatlösungen mit naszierendem Wasserstoff und stellt dann ein braunes Pulver dar. MoO_2 hat keine Basenfunktion.

Molybdändisulfid, MoS_2, entsteht durch Erhitzen von MoS_3 als schwarzes Pulver.

δ) Des fünfwertigen Molybdäns.

Molybdän(V)chlorid, $MoCl_5$, aus den Elementen bei schwachem Erhitzen darstellbar, bildet schwärzliche, jodähnliche Kristalle. Fp. 194°, Sdp. 268°. Es ist das höchste vom Molybdän bekannte Chlorid. Wird durch Wasser zersetzt.

Molybdän(V)oxyd, MoO_5, erhalten durch Fällung der Doppelsalze des fünfwertigen Chlorids mit Alkalien, besitzt die Farbe des Ferrioxydhydrats und hat keine basischen Eigenschaften.

ε) Des vermutich sechswertigen Molybdäns.

Molybdänhexafluorid, MoF_6, entsteht aus den Elementen als weiße Kristallmasse. Fp. 17°, Sdp. 35°.

Von den z. Z. hypothetischen fünf- und sechswertigen Halogeniden des Molybdäns leiten sich durch Ersatz von je einem Paar Halogenatomen gegen Sauerstoff Oxyhalogenide ab vom Typus $MoOX_3$, $MoOX_4$ und MoO_2X_2.

Gleich diesen beiden Arten von fünf- und sechswertigen Halogeniden bilden auch die dreiwertigen (siehe β) mit Alkalihalogeniden Doppel- bezw. Komplexsalze, die meist prächtig gefärbt sind, z. B. K_3MoCl_6 (rot), K_2MoCl_5 (rot), K_2MoCl_7 (rot), K_2MoCl_6 (rot), $K_2MoO_2Cl_4$ (gelb-grün). Durch Austausch des Halogens gegen den Rhodan- oder Cyanwasserstoffrest entsteht eine weitere große Gruppe von Komplexverbindungen, von denen namentlich die Salze organischer Basen eingehender studiert sind.

Molybdäntrioxyd, Mo_3. Das vom sechswertigen Molybdän abgeleitete Molybdäntrioxyd, MoO_3, ist das Anhydrid der Molybdänsäure H_2MoO_4 und entsteht als weißes, in der Hitze schwachgelbes Pulver beim Glühen von Ammonmolybdat. Oberhalb 600° beginnt es sich zu verflüchtigen und schmilzt bei Rotglut, läßt sich aber im Luftstrom bei hohen Temperaturen in Form feiner zarter Schuppen sublimieren. Ein kristallinisches Dihydrat $MoO_3.2H_2O$ entsteht bei der Zersetzung von Ammonparamolybdat mit Salpetersäure, bei 70° geht es in das Monohydrat $MoO_3.H_2O=H_2MoO_4$ über. Durch Zusatz von Salzsäure zu Natriummolybdatlösungen läßt sich kolloidales leicht auszuflockendes Trioxydhydrat darstellen.

MoO_3 löst sich, auch nach starkem Glühen, in Alkalien und Alkalicarbonaten leicht zu neutral reagierenden Molybdaten X_2MoO_4, oder bei Ueberschuß von MoO_3 zu Polymolybdaten, von denen die Trimolybdate $X_2Mo_3O_{10}$, die Oktomolybdate $X_2Mo_8O_{25}$ und die Paramolybdate $X_{10}Mo_{12}O_{41}$ — das Ammonsalz des Handels $(NH_4)_{10}Mo_{12}O_{41}$ gehört in diese Reihe — am besten bekannt sind.

Auch in Säuren wie HCl und HNO_3 löst sich MoO_3 mit Leichtigkeit, wahrscheinlich unter Bildung gemischter Anhydride wie $Cl(OH)MoO_2$. Mit Salzsäuregas verflüchtigt es sich bei 150° als Acichlorid $2HCl.MoO_3$.

In saurer Lösung wird es durch Zink reduziert zu höchst komplizierten Verbindungen, die in ihrer Gesamtheit den Namen Molybdänblau führen.

Die der Molybdänsäure entsprechende Sulfosäure H_2MoS_4 ist nur in Salzen bekannt, die durch Auflösen des Trioxyds in Schwefelammon entstehen und durch verdünnte Säuren in Schwefelwasserstoff und braunschwarzes Molybdäntrisulfid, MoS_3, zerfallen.

ζ) Des vermutlich siebenwertigen Molybdäns.

Permolybdänsäure, $HMo.2H_2O$. Molybdäntrioxydrat bildet mit Wasserstoffsuperoxyd eine aus kleinen gelben Kristallen bestehende Permolybdänsäure $HMoO_4.2H_2O$, von der auch Salze bekannt sind.

8c) Komplexverbindungen. Ueber komplexe Halogenide und Polymolybdänsäuren vergleiche oben 8b, ε. Salze von Heteropolysäuren (s. 6) erhält man durch Sättigung siedender Molybdatlösungen mit Säurehydraten (sirupöser Phosphorsäure, gelatinöser Kieselsäure usw.). Die Säuren sind aus den angesäuerten Lösungen durch Aether vermutlich als Ozoniumsalze isolierbar, die, mit Wasser zersetzt, die Säuren als oktaëdrische 28-Hydrate auskristallisieren lassen; auch 22-Hydrate sind in Form sechsseitiger Prismen darstellbar. Hervorzuheben sind die Kieselmolybdänsäure $H_8[Si(Mo_2O_7)_6]$.

$28H_2O$ und die Phosphormolybdänsäure $H_7[P(Mo_2O_7)_6] \cdot 28H_2O$, deren ebenso wie die genannten Säuren sattgelbes saures Ammonsalz $(NH_4)_3H_4[P(Mo_2O_7)_6]$ gleich den Ammoniumsalzen aller gesättigten Heteropolysäuren schwer löslich und daher als quantitative Bestimmungsform der Phosphorsäure gebräuchlich ist. Auch mit den organischen Stickstoffbasen bildet Phosphormolybdänsäure schwerlösliche Salze und dient deswegen als Reagenz auf Alkaloïde.

9. Thermochemie. Für die Oxydationswärme des Molybdäns gelten die Werte: Mo (fest) + 3O (Gas) = MoO_3 (fest) + 166.14 Cal. bei konstantem Volumen (167 Cal. bei konstantem Druck).

10. Photochemie. Flüchtige Molybdänverbindungen erteilen der Bunsenflamme eine gelblich grüne Färbung, doch wendet man zur Spektralanalyse nur Funkenspektra an, die folgende charakteristischen Linien aufweisen: gelb **603,0**, **588,8**, 585,7, 579,2, 575,1, grün 568,8, **557,0**, **533,2**, **550,6** und indigo 427,8; davon sind die fettgedruckten besonders deutlich.

11. Kolloidchemie. Ueber kolloidales Molybdän ist nichts bekannt.

Literatur. *Gmelin-Kraut, Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. III, Abt. 1. Heidelberg 1909—1910.*

F. Sommer.

f) Wolfram.

W. Atomgewicht 184.0.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Formarten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Spektralchemie.

1. Atomgewicht. Dem Wolfram kommt nach der Tabelle für 1913 das Atomgewicht 184,0 zu.

2. Vorkommen. Wolfram kommt in der Natur nicht gediegen, sondern meist als wolframsaures Salz vor. Bedeutung als Ausgangsmaterialien für die Gewinnung des Wolframs haben der Tungstein oder Scheelit $CaWO_4$, Wolframit oder Wolfram (Mn,Fe)-WO_4, Wolframbleierz oder Stolzit $PbWO_4$ und der Hübnerit oder Manganwolframit $MnWO_4$.

3. Geschichte. Der Tungstein, den Cronstedt 1758 entdeckte, galt als Eisenerz, wie auch der Wolframit als Braunstein, bis Scheele 1781 aus ersterem die Wolframsäure isolierte, die von den Brüdern D'Elhujar 1783 dann auch im Wolframit aufgefunden und in metallisches Wolfram übergeführt wurde. Der Name des Elements wurde dem Mineral entlehnt; die ausländische Fachliteratur verwendet meist Bezeichnungen, die sich von Tungstein ableiten (frz. tungstène Tu, engl. tungsten).

4. Darstellung und Verwendung. Zur Gewinnung des Wolframs und seiner Verbindungen schließt man die natürlichen Wolframate in Königswasser oder in der Sodaschmelze auf, wobei man das säureunlösliche Wolframtrioxyd (WO_3) als Rückstand oder an Natrium gebunden als wasserlösliches, leicht zu reinigendes Natriumwolframat erhält, aus dem Säuren gleichfalls WO_3 abscheiden. Dieses läßt sich durch Ueberführung in das Ammonsalz und Kristallisation reinigen und zu reinem WO_3 verglühen. Durch starkes Erhitzen mit metallischem Natrium oder durch Reduktion im Wasserstoffstrom läßt sich aus dem Trioxyd das Metall darstellen. Auch das Goldschmidtverfahren liefert ein ziemlich reines Material, wenn man das Reaktionsgemisch mit einem Drittel des Volumens flüssiger Luft versetzt. Im großen läßt sich Wolfram durch Reduktion der Wolframate mit Kohle im elektrischen Ofen erhalten.

Verwendung findet das Wolfram zur Herstellung von Spezialstählen und elektrischen Glühkörpern. Einer Stahllegierung mit ca. 30% Chrom erteilt es eine außerordentliche Härte bei großer Zähigkeit, die dem Material auch beim Erhitzen auf 600° erhalten bleiben, so daß es für Bohrer und Drehstähle hervorragend geeignet ist. Das Wolfram setzt in diesen Stählen den Einfluß der Temperatur auf die Umwandlungsgeschwindigkeit im System Martensit → Perlit auf ein Minimum herab (vgl. den Artikel Legierungen). Ein Wolframgehalt von ungefähr 6% erhöht die Magnetisierbarkeit des Stahls.

Die Fäden der Wolframlampen werden gegenwärtig aus Wolframdraht hergestellt, der aus in der Hitze gehämmertem Metall gezogen wird. Nach älteren Methoden preßte man kolloidale Wolframsäure oder mit einem Bindemittel plastisch gemachtes Trioxyd aus Düsen und reduzierte den getrockneten Faden („Spritzverfahren").

Alkaliwolframate dienen als Feuerschutzmittel zur Imprägnierung von Stoffen, da sie deren Entflammung verhindern.

Die Verwendung des Wolframs zu anderen technischen Zwecken unter Ausnutzung der Schwerschmelzbarkeit und des hohen spezifischen Gewichts (kleinkalibrige Geschosse) erscheint aussichtsreich.

Ueber Wolframbronzen siehe unten bei der speziellen Chemie.

5. Formarten. Wolfram stellt ein graues schweres Pulver oder ein stahlgraues, sprödes Metall von kristallinischer Struktur dar, das leicht feil- und polierbar ist. In der Hitze starkem Druck ausgesetzt, wird es dehnbar. Es ist unmagnetisch und ein schlechter Leiter der Elektrizität. Die Dichte ist 19,1,

die Härte 7,5 in Graden nach **Mohs**. Der Schmelzpunkt liegt bei 2825 ± 50°. Die spezifische Wärme beträgt 0,0350 für das Intervall von 20 bis 60°.

6. Valenz und Elektrochemie. Für die Valenz des Wolframs gilt ähnliches wie für das Molybdän. Die Zwei-, Vier- und Siebenwertigkeit ist zwar wahrscheinlich, doch keineswegs bewiesen, während die Dreiwertigkeit dem Wolfram überhaupt zu fehlen scheint. Dagegen ist fünf- und sechswertiges Wolfram außer Zweifel gestellt durch die normalen Dampfdichten des Penta- und Hexachlorids.

Auch das elektrochemische Verhalten des Wolframs ist dem des Molybdäns ganz analog; es sei daher auf dieses verwiesen. Abweichungen bestehen nur insoweit, daß man über Wolframkationen gar nichts weiß und daß man auf Grund der anomalen Reaktionen in den Salzen $X_2W_4O_{13}$, den sogenannten Metawolframaten, kein dem Tetramolybdation Mo_4O_{13}'' entsprechendes Tetrawolframation W_4O_{13}'' annehmen darf. Die Metawolframate sind keine Isopolywolframate, sondern Salze einer Heteropolysäure, die sich von der verdreifachten empirischen Formel ableiten und deren komplexes Anion von der Konstitution $[H_2(W_2O_7)_6]$ sich um ein Wasserstoffmolekül als „Zentralatom" aufbaut.

7. Analytische Chemie. 7a) Qualitative Analyse. *α*) Auf trockenem Wege. Perlreaktionen gibt Wolfram nur in der Reduktionsflamme, und zwar gibt die Boraxperle eine gelbe, die Phosphorsalzperle eine blaugrüne bis blaue Färbung, die bei Zusatz von Eisen(II)sulfat in blutrot übergeht.

β) Auf nassem Wege. Da alle Wolframverbindungen durch Königswasser in Wolframtrioxyd oder Wolframate übergehen, so reduziert sich die analytische Chemie des Wolframs auf die Reaktionen des Wolframations.

Starke Mineralsäuren fällen in der Kälte weißes wasserhaltiges, in der Hitze wasserärmeres gelbes Trioxyhydrat, unlöslich in Säuren, löslich in Alkalien.

Schwefelwasserstoff gibt in saurer Lösung keinen Niederschlag.

Schwefelammonium führt in Sulfosalz über, aus dem verdünnte Säuren braunes Wolframtrisulfid abscheiden.

Naszierender Wasserstoff (aus Zink und Salzsäure) oder salzsaure Zinnchlorürlösung erzeugen, besonders leicht in der Wärme, tiefblau gefärbte Lösungen.

Quecksilber(I)nitrat und Bleiacetat geben weiße Wolframatfällungen.

7b) Quantitative Analyse. Aus chloridfreien Lösungen läßt sich das Wolfram mit Quecksilber(I)nitrat als Merkurowolframat abscheiden, das durch Glühen in Trioxyd übergeht.

Allgemein anwendbar ist die Abscheidung des Wolframs als Trioxyd mittels Salzsäure. Um die Hydrosolbildung hintanzuhalten, ist mehrmaliges Eindampfen der mit Salzsäure versetzten Wolframatlösung und Anwendung angesäuerter Waschwässer erforderlich.

Empfehlenswert ist auch die Fällung der Wolframsäure mit Benzidinchlorhydrat aus sulfathaltiger Lösung. Beim Glühen hinterläßt das Benzidinwolframat Trioxyd.

8. Spezielle Chemie. 8a) Verhalten des Wolframmetalls. Bei gewöhnlicher Temperatur ist Wolfram gegen chemische Agenzien ziemlich beständig und verändert sich an der Luft nicht. Beim Erhitzen erleidet es Oxydation zu Trioxyd, und zwar unter Erglimmen, wenn es sich in feiner Verteilung befindet. Fluor greift das Metall bei Zimmertemperatur lebhaft an unter Bildung des Hexafluorides; die übrigen Halogene wirken erst in der Wärme ein, und zwar um so schwerer, je höher ihr Atomgewicht ist, auch sinkt die Wertigkeit der entstehenden Halogenide mit steigendem Atomgewicht. Von den Säuren greift nur Salpetersäure das Wolfram an, und zwar träge, Königswasser dagegen oxydiert energisch zu Trioxyd.

8b) Einfache Verbindungen. *α*) Des vermutlich zweiwertigen Wolframs.

Wolframdichlorid, WCl_2, wird durch Reduktion von WCl_6 mit Wasserstoff bei hoher Temperatur in grauen, wasserunlöslichen Krusten erhalten.

Wolframdibromid, WBr_2, ein sammetartig blauschwarzes Pulver, wird dargestellt durch Reduktion von WBr_5.

Wolframdijodid, WJ_2, entsteht durch Reduktion von WCl_5 mit Jodwasserstoff als braunes amorphes Pulver.

β) Des dreiwertigen Wolframs: bisher unbekannt.

γ) Des vermutlich vierwertigen Wolframs.

Wolframtetrachlorid, WCl_4, erhält man neben WCl_5 bei vorsichtiger Reduktion von WCl_6 mit Wasserstoff bei niederer Temperatur in Form eines graubraunen Pulvers, das sich beim Erhitzen in WCl_5 und WCl_2, beim Eintragen in Wasser in Salzsäure und WO_2 zersetzt.

Wolframtetrajodid, WJ_4, bildet schwere, aus WCl_6 und wässeriger Jodwasserstoffsäure darstellbare Kristalle.

Wolframdioxyd, WO_2, wird dargestellt durch schwaches Glühen von WO_3 in einer Wasserstoffatmosphäre oder durch Zersetzung von WCl_4 mit Wasser. Braunes Pulver.

Wolframdisulfid, WS_2, durch Schmelzen von WS_3 mit Cyankalium darstellbar, ist ein grauschwarzes Pulver.

δ) Des fünfwertigen Wolframs. Wolfram(V)chlorid, WCl_5, entsteht durch Reduktion von WCl_6 mit Wasserstoff bei niederer Temperatur in Form schwarzgrauer glänzender Nadeln. Fp. 245°, Sdp. 275°. Mit Wasser tritt Zersetzung ein unter Bildung blauer Oxyde.

Wolfram(V)bromid, WBr_5, bildet sich aus den Elementen bei Rotglut. Schwarzviolette Kristalle.

Wolfram(V)oxyd, W_2O_5, scheint sich bei der Zersetzung der beiden vorigen Verbindungen mit Wasser zu bilden, ist aber noch nicht rein erhalten worden und bildet den Hauptbestandteil der Farbe „Wolframblau".

ε) Des sechswertigen Wolframs. Wolfram(VI)chlorid, WCl_6, entsteht bei 270° aus den Elementen und stellt eine dunkelgrauviolette Kristallmasse dar, die von Wasser zu WO_3 zersetzt wird. Fp. 270°, Sdp. 345°.

Wolfram(VI)fluorid, WCl_6, bildet sich bei gewöhnlicher Temperatur aus den Elementen oder aus WCl_6 und wasserfreier Flußsäure und ist interessant, weil es trotz seiner hohen Dampfdichte (298) ein Gas ist. Sdp. 19,5°, Fp. 2,5°.

Oxyhalogenide. Auch von den sechswertigen Wolframhalogeniden leiten sich Oxyhalogenide und komplexe Halogenide ab, die den Molybdänverbindungen durchaus entsprechen (s. diese). So bilden sich z. B. $WOCl_4$, Wolframoxytetrachlorid (dunkelrote, lange Nadeln) und WO_2Cl_2, Wolframdioxydchlorid (zitronengelbe Schuppen) stets, wenn bei der Darstellung der Wolframhalogenide auch nur die geringsten Spuren von Feuchtigkeit vorhanden sind. Die komplexen Wolframhalogenide sind meist farblos.

Wolfram(VI)oxyd, Wolframtrioxyd, WO_3, wird als zitronengelbes, sehr schwer flüchtiges, säureunlösliches Pulver beim Erhitzen von Ammonwolframat erhalten, färbt sich beim Erhitzen dunkler und wird von schmelzenden Alkalien aufgenommen unter Bildung von Salzen der Wolframsäure H_2WO_4, deren Anhydrid es ist. Hydrate desselben von noch nicht einwandfrei untersuchtem Wassergehalt entstehen als typische Reaktion auf Wolframate und Polywolframate bei deren Zersetzung mit Säuren und haben große Neigung zur Kolloidbildung.

Wie die Wolframsäure sind auch die in großer Zahl beschriebenen Polywolframsäuren in freiem Zustand unbekannt, dagegen kennt man eine lange Reihe gut kristallisierender Salze, von denen die normalen durch Auflösen von Trioxydhydrat in Alkalien entstehen und stark alkalisch reagieren.

Bemerkenswert ist die Parawolframsäure, deren Salze vom Typus $M_{10}W_{12}O_{41}$.aq man durch Neutralisieren von Wolframatlösungen mit starken Säuren und Eindampfen in schönen Kristallen erhält. Außer der noch nicht bewiesenen Formel $M_{10}W_{12}O_{41}$ steht auch noch eine andere $M_6W_7O_{24}$ zur Diskussion.

Den Wolframaten entsprechen die Sulfowolframate, von denen die normalen aus einer mit Schwefelwasserstoff gesättigten Wolframatlösung mit gelber Farbe kristallisieren. Statt der freien Sulfowolframsäure erhält man beim Ansäuern ihrer Salzlösungen das Anhydrid WS_3 als schwarzbraunen Niederschlag.

ζ) Des vermutlich siebenwertigen Wolframs.

Perwolframsäure, $H_2WO_5 . H_2O$. Sie entsteht beim Auflösen von Trioxydhydrat in Wasserstoffsuperoxyd als gelbe amorphe Masse.

8c) Komplexverbindungen. Ueber die komplexen Halogenverbindungen und Isopolysäuren s. 8b, ε.

Von den in analoger Weise wie die Molybdänverbindungen dargestellten Heteropolysäuren des Wolframs sind von Interesse die Phosphorwolframsäure $H_7[P(W_2O_7)_6]$. $28H_2O$, die auch als Reagenz auf Alkaloïde und sonstige stickstoffhaltige organische Basen von Wichtigkeit ist, besonders aber die Borwolframsäure $H_9[B(W_2O_7)_6] . 28H_2O$ und die Kieselwolframsäure $H_8[Si(W_2O_7)_6] . 28H_2O$, die beiden letzten deshalb, weil bei ihnen Isomerien bekannt sind, für die es noch keine Erklärung gibt.

Die ungesättigte Säure $H_{10}[P_2(W_2O_7)_5(OH)_2]$ bildet hellzitronengelbe Tafeln und liefert im Gegensatz zu den vorigen ein leicht lösliches Ammonsalz.

Die Metawolframsäure, deren Salze durch Ansäuern von Wolframatlösungen, besser durch Absättigen derselben mit Trioxydhydrat entstehen und auf Zusatz von Säuren keinen Trioxydniederschlag geben, läßt sich ebenfalls als sehr zersetzliche Kristallmasse von der Formel $H_{10}[H_2(W_2O_7)_6]$ $. 22H_2O$ isolieren.

Unter dem Namen Wolframbronzen fasst man die durch Reduktion von Isopolywolframaten nach verschiedenen Methoden dargestellten, schön gefärbten Produkte zusammen, die technische Verwendung finden. Sie unterscheiden sich von den normalen Polywolframaten durch einen Mindergehalt von einem Atom Sauerstoff und haben die Formel $M_p(WO_3)_q$. Wichtig sind die Natriumbronzen, z. B. $Na_2W_5O_{15}$ (blau), $Na_2W_3O_9$ (rot), $Na_2W_4O_{12}$ (violett), $Na_5W_6O_{18}$ und $Na_2W_2O_6$ (gelb). Man gewinnt sie aus Gemischen von Wolframat und Trioxyd durch Glühen im Wasserstoffstrom oder durch Zusammenschmelzen mit Zinn oder Wolframdioxyd.

9. Thermochemie. Für die Oxydationswärmen wurden folgende Zahlen gefunden; $W + 3O = WO_3 + 195{,}41$ Cal. bei konstantem Volumen (96,3 Cal. bei konstantem Druck), ferner $W + 2O = WO_2 + 131{,}4$ Cal. bei konstantem Druck.

10. Spektralchemie. Wolfram gibt nur ein Funkenspektrum, aus dem folgende Linien hervortreten: im Gelb 573,4, im Grün **551,4**, 549,2, **522,4**, 507,1, 506,9, **505,3**, 501,5, 500,8, im Blau 488,8, **484,3**, 430,2, 429,5, 426,9. Die fettgedruckten Linien sind am deutlichsten.

11. Kolloidchemie. Ueber kolloidales Wolfram fehlen sichere Angaben.

Literatur. *Gmelin-Kraut, Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. III, Abt. 1. Heidelberg 1910—1912.*

F. Sommer.

g) Uran.

U. Atomgewicht = 238,8.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Verwendung. 6. Formarten. 7. Valenz. 8. Spezielle Chemie. a) Uranoverbindungen. b) Uraniverbindungen. 9. Analytische Chemie. 10. Photochemie.

1. Atomgewicht. Péligot bestimmte das Atomgewicht des Urans aus dem Chlorgehalte des Tetrachlorides, den er zu 37,2% Chlor ermittelte, zu 238,8; später fand er es durch Ueberführung des Acetats $(UO_2)(C_2H_3O_2)_2 + H_2O$ in das Dioxyd, gleich 239,5. Zimmermann fand es nach derselben Methode gleich 238,9. — Die Ueberführung von UO_2 in U_3O_8 und umgekehrt ergab 239,0. Die „Internationale Atomgewichtskommission für 1911" setzte auf der Grundlage O = 16 das Atomgewicht des Urans zu 238,5 fest.

2. Vorkommen. Uran kommt in einer großen Anzahl von Mineralien vor, die fast alle mineralogische Seltenheiten sind. Fast alle sind vermöge der genetischen Beziehungen des Radiums zum Uran radiumhaltig (vgl. „Radium" im Artikel „Berylliumgruppe") und senden Strahlen aus, die sich durch die photographische Platte erkennen lassen.

Bergwirtschaftlich und technisch besonders wichtig sind Uranpecherz, Carnotit, Autunit, Chalcolith und Thorianit. Uranpecherz (Pechblende, Uraninit, Nasturan) ist im wesentlichen U_3O_8 mit Bleiuranat. Die Pechblende stellt glänzende, grüngraue bis schwarze Massen dar. Gute Pechblende enthält 75 bis 85% U_3O_8; ganz frisches und gutes Erz bis 95% U_3O_8.

Hauptfundstätten sind in Böhmen, Sachsen, Cornwall, Nord Carolina, Cornouailles, Ostafrika.

Carnotit ist im wesentlichen Kaliumuranylvanadat, $K_2O.2UO_3.V_2O_5.3H_2O$, und enthält in reinem Zustande 62 bis 65% UO_3, entsprechend 52 bis 57% U. Carnotit stellt in reinem Zustande ein gelbes kristallinisches Pulver dar, kommt in größeren Mengen jedoch nur mit viel Quarz und Gestein vor, so daß Carnotite mit 10% Uran zu den allerbesten gehören. Hauptvorkommnisse sind in Südaustralien und in Kolorado.

Autunit (Kalkuranglimmer) ist wasserhaltiges Calciumuranylphosphat, $Ca(UO_2)_2.(PO_4)_2.8H_2O$. — Das Calcium ist darin oft durch Kupfer und die Phosphorsäure vielfach durch Vanadinsäure ersetzt, z. B. in den Autuniten von Ferghana (Turkestan). Autunit ist schwefelgelb bis grünlich, meistens stark barium- und kieselsäurehaltig; er enthält in reinem Zustande 46 bis 50% Uran, doch zählen 10% Uran enthaltende Autunite zu den besten Erzen für Verwendung im großen (Uran- und Radiumfabrikation). Hauptfundstätten sind in Böhmen, Sachsen, Cornwall, Frankreich, Portugal, Tonkin, Vereinigte Staaten und Turkestan (Ferghana).

Chalcolith (Torbernit, Kupferuranit, Uranglimmer) ist wasserhaltiges Cupriuranylphosphat, $Cu(UO_2)_2.(PO_4)_2.8H_2O$, enthält 47 bis 51% Uran, ist blaugrünlich bis apfelgrün, und kommt ebenfalls nur in Vermengung mit viel Gestein und Quarz in größeren Mengen vor. Hauptfundstätten sind in Böhmen, Sachsen, Cornwall, Portugal und Frankreich.

Thorianit ist ein in Ceylon vorkommendes Oxyd von Thorium, Uran, Zirkonium, Blei, Eisen und seltenen Erden mit 4,1 bis 10% Uran.

3. Geschichte. Das Uran wurde 1789 von Klaproth in der Pechblende und im Uranglimmer entdeckt. Er hielt aber das Oxyd UO_2 für das Metall. Erst Péligot entdeckte 1841 in diesen Oxyden Sauerstoff und gab dem von Klaproth für das Metall gehaltenen Körper die Formel UO. — Denselben Stoff gab endlich Mendelejeff, indem er das Uran in die Gruppe Chrom, Wolfram, Molybdän des periodischen Systems der Elemente einreihte und das Atomgewicht verdoppelte, die Formel UO_2.

Die folgende Zusammenstellung zeigt den Zusammenhang zwischen diesen verschiedenen Anschauungen:

Klaproth	U	UO	U_2O_3	U = 408 (wenn O = 16)
Péligot	UO	U_3O_4	U_2O_3	U = 120 (wenn O = 16)
Mendelejeff	UO_2	U_3O_8	UO_3	U = 240 (wenn O = 16)

4. Darstellung. 4a) Darstellung des Metalls α) durch Reduktion des Chlorides UCl_4 oder dessen Verbindungen mit Alkalichloriden durch Erhitzen mit Alkalimetallen und Kohle oder durch Elektrolyse des geschmolzenen Na_2UCl_6.

β) Aus den Oxyden, insbesondere dem U_3O_8 oder besser dem UO_2 durch Reduktion mit Aluminium oder Magnesium.

4b) Darstellung von Uranverbindungen aus den Erzen. Im großen werden die fein gemahlenen Uranerze einem Röst- und Schmelzprozesse unterworfen, je nach ihrer Natur mit Soda allein oder mit Soda und einem Oxydationsmittel (Salpeter); danach wird das Schmelzgut mit Wasser gewaschen und in Salz-, Salpeter- oder Schwefelsäure eingetragen und bei Siedetemperatur alles Uran aus dem Rückstand ausgelaugt. Die vom Niederschlag getrennte Flüssigkeit wird oxydiert und in einen Ueberschuß von Sodalösung eingetragen und damit gekocht. — Die verunreinigenden Metalle wie Eisenoxyd, Tonerde usw. werden hierbei ausgeschieden, während das Uran als Uranat in Lösung geht. Die getrennte Lösung wird in der Siedehitze genau neutralisiert, wobei Uranoxyd (sogenanntes „Uranoxydlichtgelb") ausfällt. — Man kann auch die Lösung übersäuern und dann das Uran durch einen Ueberschuß von Basen ausfällen. — Bei Verwendung von Natron entsteht hierbei „Natronorange", von Kali „Kaliorange" und von Ammoniak „Uranoxydammon", alles Körper, die als Uranfarben Verwendung finden.

Bei manchen Erzen und bisweilen auch dann, wenn die Gewinnung von Uranylsalzen beabsichtigt ist, ist es zweckmäßig, die fein gepulverten Erze zunächst mit Schwefelsäure bei höherer Temperatur zu behandeln oder mit sauren Alkalisulfaten zu schmelzen. Die mit Wasser ausgelaugten Produkte enthalten das Uran, das in ähnlicher Weise angereichert wird, wie oben.

5. Verwendung. Die Uransalze und Uranoxyde finden Verwendung als keramische Farben, insbesondere Porzellanfarben und zum Färben von Gläsern. Uranverbindungen finden ferner beschränkte Anwendung in der Beleuchtungstechnik, in der Stahlindustrie, zur Herstellung von Urankupferlegierungen, in der Photographie zum Tonen, Abschwächen und Verstärken, in der Photometrie, zum Färben von Fasern, Leder und Holz, in der Medizin (Uranwein gegen Diabetes), in der Chemie bei der Darstellung von Cyaniden und als Katalysator bei der Ammoniaksynthese und als Reagens in der qualitativen und quantitativen chemischen Analyse.

6. Formarten. Das metallische Uran ist ein weißes Metall mit silberähnlichem Metallglanz; es ist polierbar, läßt sich härten, hat einen glänzenden Bruch und funkt beim Reiben. Es ist sehr hart, aber etwas weicher als Stahl; es ist schwerer schmelzbar als Platin, Chrom und Molybdän, aber leichter schmelzbar als Wolfram und Vanadin. Es ist nicht magnetisch und läßt sich im elektrischen Lichtbogenofen destillieren. Das spezifische Gewicht ist 18,7, das Atomvolumen 12,84, und die spezifische Wärme im Mittel 0,028. In fein verteiltem Zustande brennt das Uran bereits bei 170° und zersetzt in diesem Zustande Wasser bei gewöhnlicher Temperatur. — Bei 1000° bildet das Uran leicht ein Nitrid.

Pyrophorisches Uran bildet sich aus Uranamalgam bei 241 bis 242° im Vakuum.

7. Valenz. Wenn das Atomgewicht des Urans zu 240 angenommen wird, so kann es drei-, vier-, fünf- und sechswertig auftreten.

Der Repräsentant der niedrigsten Verbindungsform UX_2 ist das Sulfid US, der der höchsten Oxydationsstufe UX_8 ist das Oxyd UO_4.

Das Oxyd des Verbindungstypus UX_4, d. i. das Oxydul UO_2, hat ausschließlich basischen Charakter. Dieses Oxyd wird durch Glühen der anderen Oxyde im Wasserstoffstrome erhalten, und wurde, wie oben erwähnt, früher für das Metall gehalten.

Das Oxyd des Verbindungstypus UX_6 ist das gelbe Uranoxyd UO_3. Das entsprechende Hydrat $U(OH)_6$ ist nicht bekannt, jedoch leiten sich von dem um 2 Moleküle H_2O ärmeren Hydrat $(UO_2)(OH)_2$ mit Säuren eine Reihe beständiger Salze — die Uranylsalze — ab, die den zweisäurigen Rest UO_2 (d. i. Uranyl) enthalten. Das Oxyd UO_3 hat etwas den Charakter eines Säureanhydrids; denn versetzt man Uranylsalze mit Kali- oder Natronlauge, so erhält man gelbe Niederschläge von Uranaten, z. B. $K_2U_2O_7$ oder $Na_2U_2O_7$, die in Säuren leicht löslich sind.

Das Uranpecherz U_3O_8 kann als Uranat des Uranoxyds UO_2 aufgefaßt werden: $UO_2.2UO_3$.

An der Luft gehen beide Uranoxyde durch Glühen in das Oxyd U_3O_8 über.

8. Spezielle Chemie. 8a) Uranoverbindungen. Das Oxydul UO_2 bildet mit Säuren die Uranoverbindungen, z. B. mit Schwefelsäure Uranosulfat $U(SO_4)_2.4H_2O$.

Uranoxydul, UO_2, wird durch Glühen des Oxydes UO_3 im Wasserstoffstrom als braunes oder kupferrotes pyrophorisches Pulver erhalten. Bei der Reduktion mit Kohle erhält man es als schwarzes kristallinisches Pulver. — Erhitzt man die Ver-

bindung $UO_2Cl_2 + 2KCl$ im Wasserstoffstrome zum Glühen, so erhält man UO_2 in braunen durchscheinenden oktaedrischen Kristallen.

Uranochlorid, UCl_4, Urantetrachlorid, entsteht durch direkte Vereinigung von Uran mit Chlor unter Feuererscheinung. — Auch durch Ueberleiten von Chlorwasserstoffgas über erhitztes Dioxyd UO_2 entsteht das Tetrachlorid. — Am besten erhitzt man zur Darstellung des Tetrachlorides UCl_4 ein Gemisch von Kohle mit einem beliebigen Oxyd des Urans im Chlorstrome. — Das Urantetrachlorid geht alsdann als schwerer roter Dampf über, der sich an den kälteren Stellen zu dunkelgrünen Oktaedern kondensiert. Diese rauchen an der Luft und zerfließen zu einer grünen Lösung von Uranosalz. Die Uranosalzlösungen sind stark reduzierend.

Uranosulfat, $U(SO_4)_2.8H_2O$, kristallisiert aus Wasser in grünlichen rhombischen Prismen. Zur Darstellung löst man zweckmäßig U_3O_8 in Schwefelsäure und läßt unter Zusatz von Alkohol auskristallisieren. Man hat also nicht nötig vom entsprechenden Oxyd UO_2 auszugehen. Es kristallisiert aus dem Alkohol $U(SO_4)_2.4H_2O$, während in der alkoholischen Mutterlauge Uranylsulfat $UO_2.SO_4$ gelöst bleibt.

8b) Uraniverbindungen. — Uranoxyd, UO_3. Das Trioxyd UO_3 entsteht durch Glühen von Ammoniumuranat oder on Uranylnitrat als rotbraunes Pulver. Es ist in Säuren leicht löslich zu Uranylsalzen, die alle eine charakteristische gelbgrüne Fluoreszenz zeigen.

α) Uranylsalze. Uranylchlorid $UO_2.Cl_2$ entsteht durch direkte Vereinigung von Chlor mit Urandioxyd UO_2 bei Rotglut. Es ist leicht schmelzbar, schwer flüchtig, gelb und kristallin, und löst sich leicht in Wasser, Alkohol und Aether.

Eine wässerige Lösung erhält man auch durch Auflösen des Trioxydes UO_3 in wässeriger Salzsäure. Uranylchlorid bildet mit Alkalichloriden Doppelsalze der Form $UO_2Cl_2.KCl.H_2O$.

Uranylsulfat, $UO_2.SO_4 + 3H_2O$, entsteht aus dem Nitrat durch Abrauchen mit Schwefelsäure. — Aus verdünnt schwefelsaurer wässeriger Lösung kristallisiert ein saures grün fluoreszierendes Sulfat, $UO_2SO_4.H_2SO_4$, während aus konzentriert schwefelsaurer Lösung ein nicht fluoreszierendes Pyrosulfat $UO_2.S_2O_7$ kristallisiert.

Durch Verwitterung von Pecherz entsteht Uranvitriol oder Johannit, ein kupferhaltiges Uranylsulfat, $UO_2.SO_4$. Die Mineralien Uranochalcit, Uranblüte, Uranocker sind ebenfalls aus Pechblende sich bildende basische Uranylsulfate.

Uranylnitrat, $UO_2.(NO_3)_2 + 6H_2O$, entsteht durch Lösen der Oxyde des Urans in Salpetersäure und Eindampfen. Das Nitrat kristallisiert in schönen zitronengelben, lebhaft fluoreszierenden rhombischen Prismen, die sich in der Hälfte ihres Gewichtes Wasser lösen und zerfließlich sind.

Von den Karbonaten des Uranyls sind Doppelsalze mit Alkalikarbonaten bekannt, z. B. $UO_2.CO_3 + 2K_2CO_3$, die durch Fällen von Uranylsalzen mit Alkalikarbonaten entstehen. — Liebigit ist ein in der Natur in apfelgrünen warzigen Massen vorkommendes Uranylcalciumkarbonat, $UO_2CO_3.CaCO_3.10H_2O$.

β) Uranate. Die meisten Uranate entsprechen den Pyrochromaten.

Kaliumuranat, $H_2U_2O_7$, entsteht durch Fällen von Uranylsalzlösungen mit Kalilauge, als hell orangegelber Niederschlag. Als gelbrotes kristallinisches Pulver wird Kaliumuranat durch Schmelzen von Uranylchlorid mit Chlorkalium und Salmiak erhalten

Natriumuranat, $Na_2U_2O_7 + 6H_2O$, kommt als wasserhaltiges Salz als Urangelb in Form eines zarten gelben Pulvers in den Handel; es wird wie das Kaliumsalz technisch aus Pechblende dargestellt.

Ammoniumuranat, $(NH_4)_2U_2O_7$, entsteht als gelber Niederschlag beim Vermischen von Uranylsalzlösungen mit Ammoniak. Es ist unlöslich in Ammoniak und wenig löslich in Wasser. Es kommt unter der Bezeichnung Uranoxydhydrat in den Handel.

9. Analytische Chemie. 9a) Qualitative Bestimmung. Beim gewöhnlichen Gange der qualitativen Analyse findet sich das Uran in der Schwefelammoniumgruppe und innerhalb dieser beim Eisen. Durch Auflösen des uran- und eisenhaltigen Niederschlages in Säure und Fällen mit einem Ueberschuß von Ammoniumkarbonat läßt sich das Uran von Eisen trennen, da es sich im Ueberschusse von Ammonkarbonat auflöst.

Besser ist es, die ganze Schwefelammoniumfällung bei Gegenwart von Hydroxylaminchlorid vorzunehmen, wodurch das Uran in Lösung bleibt und zu den Erdalkalien kommt, von denen es nach Zerstörung des überschüssigen Hydroxylamins leicht getrennt werden kann.

Aus Uranylsalzen fällt Schwefelammonium braunes unbeständiges Uranylsulfid UO_2S.

Uranosalze sind grün und leicht zu den gelben fluoreszierenden Uranylsalzen oxydierbar, mit denen man es deshalb in der Analyse fast allein zu tun hat.

Uranverbindungen färben die Phosphorsalzperle im Oxydationsfeuer gelb; beim Erkalten wird die Perle grünlich.

Uranylsalze geben mit Kaliumferrocyanid einen braunroten Niederschlag von

Uranylferrocyanid. Dies ist eine sehr empfindliche Reaktion.

9b) Quantitative Bestimmung. Zur quantitativen Bestimmung führt man die Uranverbindungen in Uranlsalze über, fällt mit Ammoniak, wäscht mit 4-prozentiger Ammonnitratlösung aus und führt das Ammoniumuranat durch Glühen an der Luft in das grüne Oxyd U_3O_8 über, das man wägt. Es ist zweckmäßig, dieses Oxyd im Wasserstoffstrom zum Oxydul, UO_2, zu reduzieren und dieses zu wägen.

Durch die Reduktion der Uranylsalze mit Zink und Säure zu Uranosalz und Rücktitration dieses mit Permanganat läßt sich Uran auch leicht und genau oxydimetrisch bestimmen.

Auch durch Fällungsanalyse des Uranylacetats mit Natriumphosphat läßt sich Uran titrimetrisch bestimmen.

In Autuniten ist es wegen des großen Calciumgehaltes zweckmäßig, das Uran als Phosphat in essigsaurer Lösung zu fällen.

10. **Photochemie.** Die Uranylsalze geben ein eigentümliches charakteristisches Absorptionsspektrum, das sich natürlich ändert, wenn man die Uranylsalze zu Uranosalzen reduziert.

Das Funkenspektrum des Urans zeigt eine große Anzahl heller Linien. Die wichtigsten davon sind fünf helle Linien im Grün und drei sehr helle Linien im Violett.

Uraniverbindungen (Uranylsalze) geben bei gleichzeitiger Gegenwart organischer Substanzen unter Bildung von Uranosalzen leicht Sauerstoff ab; diese Oxydationen werden durch Licht sehr beschleunigt. Deshalb sind Uranverbindungen in vielen Fällen Katalysatoren für photochemische Oxydationsprozesse.

Viele organische Uranylsalze werden daher im Lichte rasch zu Uranoxydul reduziert.

Uran ist als radioaktives Element (d. h. als instabiles Atom) in einem langsamen, aber ständigen Zerfall begriffen, in dessen Verlauf α-Partikeln ausgeschleudert werden und ein neuer Stoff, das Uran X entsteht, durch dessen weitere Zersetzung sich die Elemente Jonium, Radium und dessen Zersetzungsprodukte bilden, die sich zum Teil im Ausgangsmaterial (der Uranverbindung) anhäufen. Da die α-Strahlen nichts anderes als positiv geladene Heliumatome (He^{++}) sind, ist jede Uranverbindung ein ständiger Produzent von Helium. Der Zerfall des Urans erfolgt sehr langsam; die Geschwindigkeitskonstante des Zerfalls ist $\lambda = 4 \times 10^{-18} \times \sec^{-1}$; die mittlere Lebensdauer des Uranatoms mithin $\frac{1}{\lambda} = 9 \times 10^9$ Jahre. — Die Reichweite der α-Strahlen in Luft ist 2,5 und 2,9 cm bei 15° und zwar kommen auf jedes Uranatom zwei α-Strahlen. Daraus folgt, daß das Uran wahrscheinlich komplex ist und aus Uran I (Halbwertszeit 5×10^9 Jahre) und Uran II (Halbwertszeit 2×10^6 Jahre) besteht. Da jede Uranverbindung etwa 36 Tage nach eventueller Befreiung vom Uran X die Gleichgewichtsmenge an Uran X enthält, das seinerseits ein β- und γ-Strahler ist, so sendet das Uran im Gleichgewicht mit Uran X α-, β- und γ-Strahlen aus. Das Uran X ist ein Analogon des Thoriums und kann vom Uran leicht durch Adsorption an kolloiden (Ferrihydroxyd, Kohle, Kieselsäuregel) oder an fein verteilten Körpern mit großer Oberfläche (frisch gefälltes Baryumsulfat) getrennt werden. Frisch vom Uran X befreites Uran sendet nur α-Strahlen aus (vgl. den Artikel „Radioaktivität").

Literatur. *Gmelin-Kraut, Handbuch der anorganischen Chemie III, 1.*

E. Ebler.

Säugetiere (Mammalia).

1. **Die Klasse Mammalia.** Die Säugetiere bilden eine von den anderen Wirbeltieren scharf abgegrenzte Klasse, die bereits von Aristoteles unter der Bezeichnung „lebendig gebärende Vierfüßer" aufgeführt wird. Als Hauptmerkmale werden genannt: Das Lebendiggebären, der Besitz von vier Extremitäten, von Haaren und von Zitzen als Ausführapparate der Milchdrüsen. Letzteres Merkmal bestimmte Linné der Klasse den Namen „Mammalia, Säugetiere" zu geben. Ein ebenso scharfes Unterscheidungsmerkmal ist aber der Besitz von Haaren, die den Säugetieren ganz allein unter allen Wirbeltieren zukommen und Oken konnte sie daher mit vollem Rechte auch als „Haartiere" bezeichnen.

Die Diagnose der Säugetiere lautet folgendermaßen: „Zu den Amnioten gehörige Wirbeltiere, lungenatmend, mit einer Allantois, homoiotherm. Mit zwei Paar Extremitäten, die sehr verschiedenartig differenziert sind. Die Haut ist mit Haaren bedeckt, die sekundär schwinden können, außerdem finden sich noch Reste eines alten Schuppenkleides. Zur Ernährung der Jungen bilden sich

Hautdrüsen zu Milchdrüsen aus, die bei den niedersten Formen mit zahlreichen Oeffnungen auf zwei abdominalen Drüsenfeldern ausmünden, bei allen anderen in besondere Hauterhebungen, Zitzen, zusammengefaßt werden. Der Schädel artikuliert mit dem Atlas durch 2 Gelenkhöcker, die an den Exoccipitalia sitzen, und der Körper des Atlas ist mit dem Epistropheus verwachsen. Der Unterkiefer wird ausschließlich vom Dentale gebildet und ist dem Squamosum eingelenkt. Die drei in der Paukenhöhle liegenden Gehörknöchelchen sind aus umgebildeten Teilen des Visceralskelettes entstanden. Das Trommelfell ist im Tympanicum ausgespannt. Der Jochbogen verbindet das Squamosum mit dem Maxillare. Die Wirbel sind vollkommen verknöchert und mit Epiphysen versehen. Unter sich sind sie durch faserknorpelige Bandscheiben verbunden. Die Zahl der Halswirbel ist fast stets auf 7 normiert. Sie sind scharf von den darauf folgenden Brustwirbeln zu unterscheiden, und auch Brust-, Lenden-, Sakral- und Schwanzregion der Wirbelsäule sind fast stets voneinander deutlich abgegrenzt. Nur bei den Monotremen erreicht das Coracoid das Brustbein, bei allen anderen ist es zu einem Fortsatz des Schulterblattes reduziert. Die Bezahnung ist ursprünglich diphyodont, aus Milch- und Dauergebiß bestehend, doch kann eine Zahngeneration oder auch beide unterdrückt werden. Die Zähne sitzen stets in Alveolen. Das Gehirn zeigt eine innerhalb der Klasse zunehmende Entwickelung des Großhirns entsprechend der Zunahme der Intelligenz. Auch das Kleinhirn kompliziert sich. Nur den Monotremen fehlt das Kommissurensystem des „Balkens". Stets ist ein Riechhirn abgesondert. Die Leibeshöhle wird durch eine transversale Scheidewand, das Zwerchfell, in Brust- und Bauchhöhle gesondert. Die Säugetiere sind Warmblüter, und ihr Herz enthält zwei Kammern und zwei Vorkammern. Die Scheidung in eine rechte und eine linke Hälfte ist vollkommen. Der linke Aortenbogen persistiert allein. Das Blut enthält außer Lymphzellen und Blutplättchen kernlose und scheibenförmige rote Blutkörperchen. Der Kehlkopf ist kompliziert gebaut, insbesondere tritt der Schildknorpel und der Kehldeckel auf. Nur die bleibende Niere funktioniert nach der Geburt. Eine Harnblase ist stets vorhanden. Am weiblichen Geschlechtsapparat ist entweder eine Scheide noch nicht differenziert (Monotremen) oder noch paarig (Marsupialier) oder unpaar (Monodelphier). Nur die Monotremen sind eierlegend, bei den Monodelphiern bildet sich zur Ernährung des Embryos im Uterus der Mutter aus Eihüllen und Uteruswand eine Placenta aus."

2. Morphologie und Physiologie. **2a) Aeußere Körperform.** Der in horizontaler Richtung angeordnete Körper der Säugetiere erhebt sich auf den 4 Extremitäten, die im großen und ganzen vertikal zur Körperachse stehen. Nur bei einigen wasserlebenden Formen fehlen die hinteren Gliedmaßen (Sirenen, Zahnwale, Bartenwale), während die vorderen zu Schwimmflossen umgewandelt sind. Bei weitem die überwiegende Mehrzahl der Säugetiere ist dem Leben auf der Oberfläche des Landes angepaßt, andere sind Baumkletterer, einzelne Arten sowie auch eine ganze Ordnung (Chiroptera) haben Flugvermögen erworben, und demgemäß eine dafür geeignete Körpergestalt erhalten. Andere Formen wieder haben eine teilweise unterirdische grabende Lebensweise angenommen, und es ist daher bei der großen Verschiedenheit der Lebensweise auch die äußere Körperform der Säugetiere eine recht vielgestaltige. Für die große Mehrzahl der Säugetiere, die sich laufend auf der Oberfläche des Landes bewegen, gilt etwa folgender Bauplan. Im Gegensatz zu den anderen vierfüßigen Landwirbeltieren ist der Körper nicht zwischen die 4 Extremitäten eingesunken, sondern erhebt sich auf ihnen. Stets findet sich ein scharf vom Rumpfe durch eine Halspartie abgesetzter Kopf und der fast stets drehrunde Schwanz setzt sich ebenfalls scharf vom Rumpfe ab. Am Kopfe finden sich äußere, zum Auffangen des Schalles dienende Ohrmuscheln, die mit Muskeln versehen sind und meist bewegt werden können. Auch die Nase ist äußerlich deutlicher sichtbar als bei den anderen terrestrischen Wirbeltieren, indem sich in der Umgebung der Nasenöffnungen eine mehr oder minder ausgebreitete nackte, oft feuchte Hautregion findet, und auch die Nase kann durch Muskulatur bewegt werden. Am Auge findet sich außer der Nickhaut der niederen Vertebraten noch ein oberes und ein unteres Augenlid. Die Mundspalte ist von meist beweglichen Lippen umsäumt. An der Vorderextremität ist der Oberarm nach rückwärts eingelenkt, der Unterarm nach vorwärts und die Hand noch stärker nach vorwärts gerichtet, während an der Hinterextremität der Oberschenkel vorwärts, der Unterschenkel rückwärts und der Fuß wieder stark nach vorwärts angeordnet sind.

2b) Haut. Wie die Haut der anderen Vertebraten so besteht auch die der Säugetiere aus zwei ganz verschiedenen Schichten, der aus dem Ektoderm stammenden Oberhaut, Epidermis, und der mesodermalen Lederhaut, Corium. Die Epidermis ist ein mehrschichtiges Epithel, an dem sich bei den höheren Säugetieren folgende Schichten unterscheiden lassen. Zu unterst liegt die Keim-

schicht, Stratum germinativum oder Rete Malpighi, aus mehreren Zellschichten bestehend, von denen die unterste aus Zylinderzellen zusammengesetzt ist; darüber liegen durch Intercellularbrücken verbunden, mehr polyedrische, sogenannte „Stachelzellen". Ueber der Keimschicht liegt die Hornschicht, Stratum corneum, in der sich, bei dicker Epidermis besonders deutlich ausgeprägt, folgende Lagen wahrnehmen lassen. Zu unterst findet sich ein Stratum granulosum, dessen Zellen mit glänzenden Körnchen von Keratohyalin erfüllt sind, die indessen mit dem Verhornungsprozeß nichts zu tun haben. Darüber liegt das Stratum lucidum mit halbflüssigem, aus Eleidin bestehendem Zellinhalt. Eleidin wird als eine Vorstufe des tierischen Fettes Lanolin aufgefaßt, und bedingt die Undurchlässigkeit der Epidermis für Wasser. Zu oberst liegt das eigentliche Stratum corneum, in welchem der Verhornungsprozeß vor sich geht. Dabei werden die Kerne allmählich zerstört und durch Hohlräume ersetzt, und auch die Konturen der abgeflachten Zellen werden undeutlicher.

Wir kommen nun zu der Frage, ob sich auch bei den Säugetieren Prozesse vorfinden, die sich mit der Häutung bei Amphibien und Reptilien vergleichen lassen. Eine solche Häutung findet bei Säugetieren, wenigstens im erwachsenen Zustande nicht statt. Dagegen sind damit vergleichbare Vorgänge während der Embryonalzeit bekannt. Entweder findet hier eine sehr reichliche Abstoßung der oberflächlichsten Zellen statt, die mit dem Sekret von Hautdrüsen zusammen die sogenannte Fruchtschmiere, Vernix caseosa, bilden, oder aber diese Zellen können in Zusammenhang bleiben und als den Embryo umgebende dünne Hülle, das Epitrichium, abgestoßen werden (Faultier, Ameisenbär, Halicore, Dicotyles, Delphin). Bei erwachsenen Tieren erfolgt auch ein fortwährendes Abschilfern von Hornzellen, die aber nicht in Zusammenhang stehen, sondern stets in Form kleinster Schüppchen auftreten. Man kann daher der Epidermis auch eine sekretorische Funktion zusprechen. Pigment tritt in den tiefsten Lagen der Epidermis sowohl in feinen Körnchen der Epidermiszellen als auch in besonderen von der Lederhaut eingewanderten Pigmentzellen auf. Unter der Epidermis liegt die Lederhaut, Cutis oder Corium, die aus dem Hautfaserblatt des Mesoderms entstanden ist. Während bei den niederen Wirbeltieren die bindegewebigen Fasern, aus denen sich die Lederhaut zusammensetzt, sich in Bündeln vereint in ziemlich regelmäßiger Anordnung durchkreuzen, sind sie bei den Säugetieren regellos miteinander verflochten. Dazwischen finden sich in geringerer oder größerer Anzahl elastische Fasern. Nach innen zu grenzt die Lederhaut an das lockere, oft sehr fettreiche Unterhautgewebe an, und geht mitunter in letzteres ganz allmählich über. Die der Epidermis zugewandte Fläche ist meist nicht eben, sondern teils leicht gewellt, teils zu oft sehr hohen Papillen ausgezogen, statt deren auch leistenförmige Erhebungen auftreten können. Die

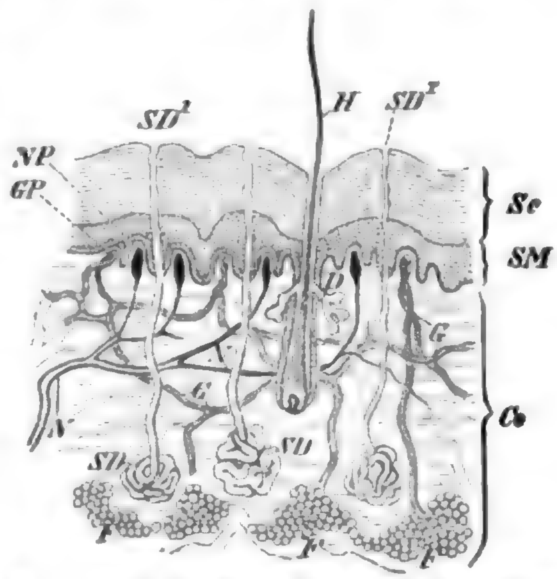


Fig. 1. Schnitt durch die Haut des Menschen. Co Corium, D Haarbalgdrüsen, FF subkutanes Fett, G Coriumgefäße, GP Gefäßpapillen, H Haar, N Nerven im Corium, NP Nervenpapillen, Sc Stratum corneum, SD Schweißdrüsen SD¹ SD² deren Ausführgänge, Sm Stratum germinativum. Aus Wiedersheim.

Papillen der Lederhaut, welche in die Epidermis eindringen, dienen nicht nur zur Befestigung der letzteren an die Lederhaut, sondern auch zur Ernährung der Epidermis, indem ein feines Netz von Blutgefäßen in sie hineindringt. Auch Hautnerven und damit verbundene Tastorgane finden sich in den Cutispapillen vor. Die Dicke der Lederhaut ist sehr verschieden und danach bemißt sich zum Teil auch ihre technische Verwendung zu Leder. Sehr dick ist sie bei manchen Huftieren, dem Elefanten und Walroß, dagegen sehr dünn bei den meisten Walen, nur der Braunfisch, und mehr noch die beiden arktischen Zahnwale Narwal und Weißwal haben eine dickere, technisch verwertbare Lederhaut.

Wenn auch für die Säugetierhaut der Besitz von Haaren kennzeichnend ist, so kommen doch außerdem noch vielfach Bildungen vor, die sich an die Schuppen der niederen Landwirbeltiere anschließen, und als Erbteil derartiger Vorfahren anzusehen sind. Sie bestehen ebenfalls aus einer Cutispapille, die von einer mit stark verhorntem Stratum corneum versehenen Epidermis bedeckt ist. Solche Schuppen

finden sich in der ganzen Ausdehnung des Körpers dachziegelförmig angeordnet bei den Schuppentieren, an einzelnen Stellen, besonders am Schwanz und den Extremitäten, auch bei anderen Säugetieren. Gleichzeitig mit den Schuppen treten meist Haare auf, deren regelmäßige, durch die Schuppen bedingte Anordnung sich auch erhalten kann, wenn die Schuppen geschwunden sind.

Auch Hautverknöcherungen können sich damit kombinieren, so bei den Gürteltieren, und auch bei Zahnwalen zeigen sich die letzten Reste eines ehemaligen Hautpanzers.

Vom Stratum corneum der Epidermis gehen bei manchen Säugetieren besondere Hornbildungen aus, die verschiedenen Zwecken dienen, so der Schnabel des Schnabeltieres, die Kastanien des Pferdes, der Schwanzstachel des Löwen, der Sporn des Ameisenigels usw. Auch das Horn des Nashorns ist eine reine Hornbildung und besteht aus langen Hornfasern, in welche sich die Cutis in Form feiner Papillen hinaufzieht. Keineswegs sind aber diese Hornfasern mit Haaren zu identifizieren. Bei den Bartenwalen stehen zu beiden Seiten des Gaumens in großer Zahl transversal angeordnete Platten aus horniger, äußerst elastischer Substanz, dem Fischbein. Diese „Barten" dienen als Filter oder Reusen für die aus kleinen planktonischen Organismen bestehende Nahrung, und können beim Grönlandswal bis fast 5 m Höhe erreichen. Man faßt sie als Weiterbildungen von Gaumenleisten auf, wie sie bei manchen Säugetieren auftreten. Andere Hornbildungen

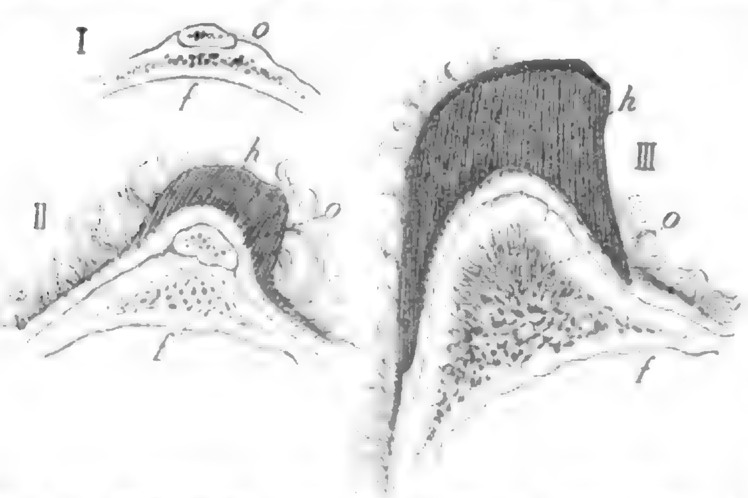


Fig. 2. Entwickelung des Os cornu. o Os cornu, f Hornzapfen auf dem Frontale, h Hornscheide. Nach A. Brandt.

sind die Hörner bei jenen Huftieren, die danach als Cavicornier bezeichnet werden. Hier gewinnt die knöcherne Unterlage des Hornes bedeutende Ausdehnung, und bildet einen knöchernen Stirnzapfen, der aus zwei ursprünglich gesonderten Teilen entsteht, einem vom Stirnbein ausgehenden „Hornstiel" und einem aus einem besonderen Knochen hervorgehenden „Hornzapfen", die beide innig miteinander verschmelzen. Ersterer Skeletteil entspricht dem Rosenstock des Hirschgeweihes, letzterer der Stange. Ueberzogen wird die knöcherne Unterlage von einer festen Hornschicht, die von der Basis aus neuen Zuwachs erfährt. Wenn dieses Wachstum in bestimmten Perioden erfolgt, kann es zur Bildung besonderer ringförmiger Verdickungen kommen, die z. B. beim Rind Anhaltspunkte zur Bestimmung des Alters gewähren. Zwischen den Hornbildungen der Cavicornier und dem Geweih der Hirsche ergeben sich mancherlei Uebergänge. Die Verbindung des Geweihes mit dem Schädel vermittelt ein solider Knochenfortsatz des Stirnbeines, der „Rosenstock", der von behaarter Kopfhaut überzogen wird. Die sich daran ansetzende Stange ist als ein Hautknochen zu betrachten, der von der darüber befindlichen Epidermis befreit wird, indem diese eintrocknet und durch „Fegen" abgestreift wird. Alljährlich werden die Stangen abgeworfen und durch neue, im allgemeinen stärkere und mehr verästelte ersetzt. Ein solches periodisches Abstoßen kennen wir übrigens auch bei Cavicorniern, so wird bei Antilocapra die Hornscheide alljährlich nach der Brunst abgeworfen. Bei den Giraffen sind die kurzen knöchernen Grundlagen der Hörner ursprünglich vom Schädel getrennt und verschmelzen erst später mit ihm, und außerdem kommt es weder zur Bildung von Hornscheiden, noch zum Eintrocknen und Fegen der Epidermis, die vielmehr einen dauernden behaarten Ueberzug bildet.

Anderer Art sind die Hornbildungen an den Endgliedern der Extremitäten, die sich an Bildungen der übrigen Landwirbeltiere anschließen. Als Ausgangspunkt für diese Hornbildungen ist die Kralle anzusehen, von der sich zwei andere Zustände, der Plattnagel und der Huf ableiten lassen. Die Säugetierkralle ist eine weitere Differenzierung der stumpferen Reptilienkralle, und findet sich besonders ausgeprägt bei Raubtieren und grabenden Säugetieren. Eine solche Kralle besteht aus einer festen dorsalen, seitlich übergreifenden Nagelplatte und einem weicheren ventralen „Sohlenhorn". Letzteres kann verkürzt werden durch Ausbildung

elastischer Hautkissen an der ventralen Seite der Finger: der Zehenballen. Bei geringerer Wölbung der Nagelplatte in Längs- wie Transversalrichtung und Re-

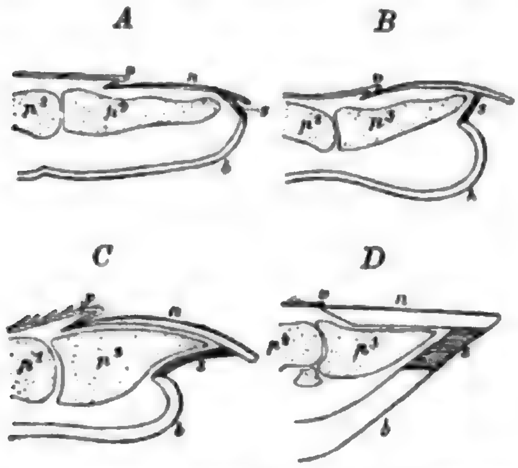


Fig. 3. Längsschnitte durch das Fingerende von A Mensch, B Affe, C unguiculater Säuger, D Pferd. b Sohlenballen, n Krallenplatte, p^2, p^3 die beiden letzten Phalangen, s Sohlenhorn, v Krallenwall. Aus Weber.

duktion des ventralen Sohlenhorns zu einem „Nagelsaum" entsteht der Plattnagel (Affen, Mensch). Eine andere Bildung ist die „Klaue" und der „Huf". Beim Huf ist die Hornplatte stark nach einwärts gewölbt und umfaßt das derbe Sohlenhorn, das auch den Boden berührt. Der Zehenballen dringt zapfenförmig in das Sohlenhorn ein und verhornt gleichfalls. Den bei Einhufern vorkommenden „Kastanien", die z. B. beim Pferde oberhalb des Vorderfußwurzelgelenkes an der medialen Seite des Unterarms liegen, hinten an der medialen Seite des Hintermittelfußes, sind Hornwarzen, die aus den Karpal- und Tarsalballen der fünfzehigen Vorfahren entstanden sind. Den Walen fehlen Hornbildungen an den Extremitäten völlig, bei Sirenen sind sie teilweise verschwunden, so bei Halicore und Manatus inunguis. Die wichtigste Hornbildung im Integument der Säugetiere ist das **Haar**.

Aeußerlich erscheint es als ein solider elastischer Hornfaden, im Querschnitt rund oder oval oder abgeplattet und am freien Ende zugespitzt. Das Haar ist in die Haut in eine röhrenförmige Vertiefung, den Haarfollikel, eingesenkt. Man unterscheidet am Haare den freien Schaft und die Haarwurzel, mit einem etwas angeschwollenen untersten Teile, der Haarzwiebel. Haarwurzel und Haarzwiebel sitzen im Follikel. In die Haarzwiebel ragt eine meist kleine Cutispapille hinein. Die Wandung des Follikels heißt Haarbalg. Das Haar selbst besteht aus einer inneren Markssubstanz, die aber auch fehlen kann, und die aus kubischen keratohyalinhaltigen Zellen mit rudimentärem Kern zusammengesetzt ist, und einer Rindensubstanz, langgestreckten, verhornten, innig miteinander verbundenen Zellen. Näher der Haarzwiebel zu werden die Zellen des Haares weicher. Außen wird das Haar von einer dünnen Schicht dachziegelförmig gelagerter, flacher, verhornter, kernloser Epidermiszellen, dem „Oberhäutchen" bedeckt. Umgeben wird das Haar vom Haarbalg, der sich aus einem epidermoidalen und einem aus der Cutis stammenden Anteil zusammensetzt. Ersterer wird als „Wurzelscheide" bezeichnet und besteht aus einer inneren und einer äußeren Wurzelscheide. Die innere Wurzelscheide ist zu innerst von einer Scheidencuticula umhüllt und besteht aus zwei verschiedenen Zellenlagen, einer inneren einfachen Schicht kernhaltiger Zellen, der Huxleyschen Schicht, und einer äußeren einfachen oder doppelten Lage flacherer kernloser Zellen, der Henleschen Schicht. Die innere Wurzelscheide geht nicht bis zur Oberfläche der Haut, sondern bricht vorher am Haarhals ab.

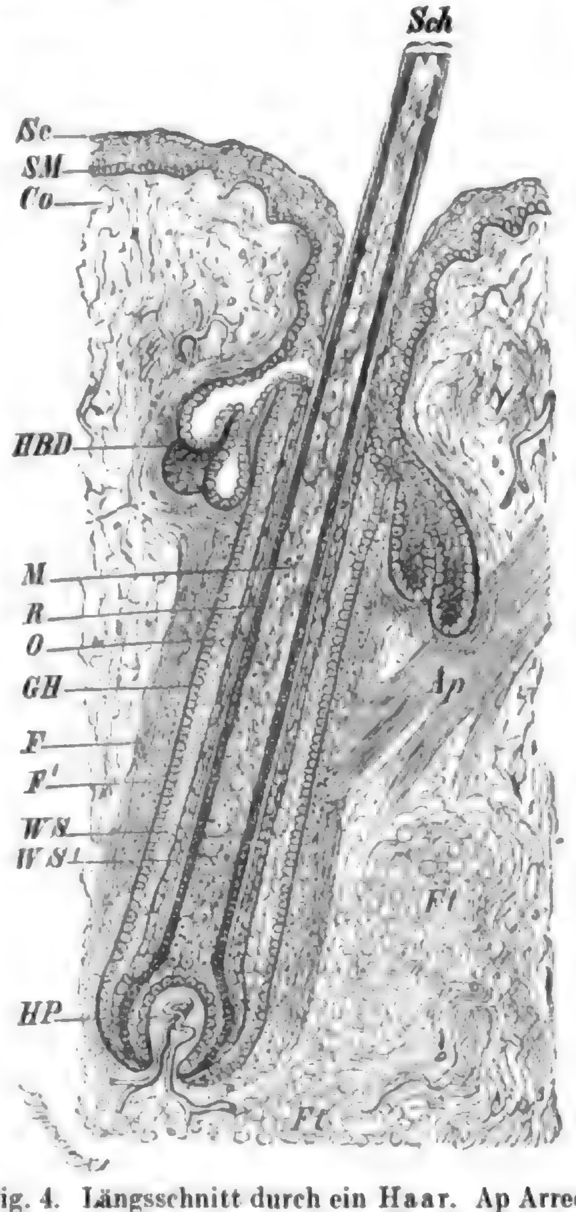


Fig. 4. Längsschnitt durch ein Haar. Ap Arrectores pili, Co Corium, F äußere Längsfaserschicht, F^1 innere Ringfaserschicht des bindegewebigen Haarbalges, Ft Fettgewebe, Gs Glashaut, HBD Haarbalgdrüsen, HP Haarpapille, M Markschicht, O Oberhäutchen, R Rindenschicht, Sc Stratum corneum, Sch Haarschicht, SM Stratum germinativum, WS äußere, WS^1 innere Wurzelscheide. Aus Wiedersheim.

Die äußere Wurzelscheide ist eine Fortsetzung der äußeren Epidermis, deren Schichten sich in die Tiefe senken. Nach außen wird sie durch die Glashaut von dem bindegewebigen Anteile des Haarbalges begrenzt, der innen eine Ringfaserschicht, außen eine gefäß- und nervenreiche Längsfaserschicht enthält.

Die meisten Säugetiere weisen 3 Hauptformen von Haaren auf, das relativ gerade gleichmäßig starke „Leithaar", welches den Mittelpunkt einer Haargruppe bildet, in welcher die „Grannenhaare" und die zahlreichen zarteren „Wollhaare" stehen. Diese 3 Hauptformen können durch Uebergänge miteinander verbunden sein. Die Leithaare sind besonders bei grabenden, in Schlupfwinkeln sich bewegenden und schwimmenden Säugetieren deutlich ausgeprägt und scheinen ursprünglich in Reihen angeordnet zu sein. Durch komplizierte Ausbildung der Haarpapille kommen die Stacheln zustande, wie wir sie von Echidna, Igel, Stachelschwein usw. kennen, und durch Ausbildung stärkerer Nervenplexus in dem Haarbalg und Ausbildung spongiöser Bluträume im bindegewebigen Haarbalg werden Tast- oder Sinushaare erzeugt. Vielfach sind die Haare in kleine Gruppen geordnet, was auf topographische Beziehungen zu ehemals vorhandenen Schuppen zurückgeführt wird. Die Haare sind mit Pigment versehen; wo dieses fehlt, ist das Haar weiß, was auf der totalen Reflexion des Lichtes in eingeschlossenen kleinen Luftbläschen beruht. Jedes Haar hat seine bestimmte Lebensdauer und wird dann gewechselt. Das kann nach der Jahreszeit erfolgen (Sommer- und Winterkleid), außerdem aber findet ein andauernder Haarwechsel statt, indem das neue Haar wohl meist auf einer neuen Haarpapille entsteht, während die alte zugrunde geht. Völliger Haarmangel tritt nur bei sehr wenigen Formen auf, so bei Zahnwalen, von denen aber manche auch im erwachsenen Zustande in der Oberlippe zu Sinnesorganen umgeänderte Haarfollikel besitzen, andere wenigstens embryonal noch Haaranlagen zeigen. Nur bei den arktischen Formen Weißwal und Narwal sowie beim Pottwal ist ein gänzlicher Haarmangel auch in embryonaler Zeit festzustellen.

Ein Haarwechsel findet häufig schon beim Fötus statt, indem das feine Haarkleid von Wollhaaren abgestoßen wird. Beim Menschen z. B. ist die Behaarung des Fötus dichter als die des Neugeborenen und in ihrer Anordnung der der anthropoiden Affen ähnlich.

Die Entwickelungsgeschichte des Haares zeigt mancherlei Aehnlichkeiten mit der der Feder, daneben aber auch Verschiedenheiten. Vor allem springt das sich entwickelnde Haar niemals als schuppenartiges oder zottiges Gebilde über die Oberfläche der Epidermis vor, sondern wächst von der tiefen Epidermisschicht aus in das Corium ein, und erst wenn dieser Epidermiszapfen eine gewisse Länge erreicht hat, beginnt an seinem Grunde eine Cutispapille zu erscheinen. Während also die Federanlage als eine emporwachsende Cutispapille erscheint, ist die erste Haaranlage eine in die Tiefe sinkende Epidermisknospe. Diese und andere Verschiedenheiten und andererseits die Aehnlichkeit der Haaranlagen mit den Sinnesknospen in der Haut der Fische und Amphibien führten F. Maurer zu der Hypothese, daß die Haaranlagen aus solchen umgewandelten Hautsinnesorganen entstanden seien. Andere Forscher erklären indessen die auffälligen Unterschiede in Anlage und Bau von Feder und Haar als sekundäre Merkmale und halten sie für untereinander und bis zu einem gewissen Grade auch mit der Reptilienschuppe homolog, von der sie als divergente Bildungen abstammen. Das Haar kann durch besondere, aus der Cutis hervorgegangene Muskeln, die Musculi arrectores pilorum bewegt werden.

Die Hautdrüsen der Säuger schließen sich teilweise an die der Amphibien an, während die Haut der Sauropsiden fast drüsenlos ist. Es lassen sich zwei Grundformen unterscheiden, die tubulösen oder Schweißdrüsen und die acinösen oder Talgdrüsen. Erstere sind röhrenförmig, am Ende häufig aufgeknäuelt, selten verzweigt (z. B. bei Bär und Nilpferd) und mit einschichtigem Drüsenepithel ausgestattet, der Ausführgang ist gerade oder gewunden. Eine zarte Umhüllung glatter Muskelfasern nähert diese Drüsen den Schleimdrüsen der Amphibien. Oft münden sie in den distalen Abschnitt des Haarbalges aus. Ihr sehr wasserreiches Sekret ist Träger spezifisch riechender Stoffe. Ferner werden durch diese Drüsen unbrauchbare Stoffe aus dem Körper entfernt, und durch Verdampfung der Flüssigkeit wird die Körpertemperatur reguliert. Mitunter sind die Schweißdrüsen auf bestimmte Regionen beschränkt, so z. B. auf die Fußsohlen bei den Nagern und Insektenfressern oder den Schwanz bei Hirschen, während sie den Walen und Sirenen, aber auch manchen Insektivoren und Edentaten völlig fehlen. Das Sekret der tubulösen Drüsen wird abgeschieden ohne daß dabei ein Zerfall der Zellen eintritt.

Bei den traubenartig verzweigten acinösen Drüsen dagegen geht bei der Sekretion ein Teil des mehrschichtigen Epithels, welches sie bildet, zugrunde, auch fehlt ihnen die glatte Muskulatur, die den tubulösen Drüsen zukommt. Fast stets sind sie an das Vorkommen von Haaren geknüpft, und sitzen

als Talgdrüsen zu 2 bis etwa 5 am Halse des Haarfollikels, ein fettiges Sekret absondernd, welches von dem Stratum granulosum der Epidermis geliefert wird. Auch an haarlosen Stellen finden sie sich (Lippen, Augenliderrand, After, Glans penis), doch wird alsdann eine Reduktion ehemals vorhandener Haarfollikel angenommen.

Häufig finden sich bei den Säugetieren größere Drüsenkomplexe zusammengesetzter Natur, die meist in taschenartige Einstülpungen der äußeren Haut einmünden; gelegentlich können diese Einsenkungen auch vorgestülpt werden. Die Drüsen, welche diese Komplexe zusammensetzen, sind entweder nur einer Drüsenart zugehörig oder aus beiden gemischt. Teils werden spezifische Drüsenstoffe produziert, welche den Individuen eine Art gegenseitige Witterung geben und auch zur Geschlechtsreizung dienen und alsdann meist auf das Männchen beschränkt sind, teils ist das Sekret schmierig-fettig und dient zur Verminderung der Reibung an den Gelenken. Zu ersterer Gruppe gehören die Analdrüsen, deren Sekret ausgespritzt werden kann (Stinktier), ferner Drüsen auf dem Damm (Zibethkatzen) oder an der dorsalen Schwanzwurzel (Violdrüse bei Fuchs und Wolf) oder gehäufte Präputialdrüsen bei Nagern (Bibergeil, Castoreum des Bibers). Vor dem Penis in der Bauchhaut liegt der Moschusbeutel des männlichen Moschustieres. Auch am Rumpf finden sich bei manchen Formen Drüsen ähnlicher Art, beim Gemsbock liegt eine als „Brunstfeige" bezeichnete Drüse am Hinterkopf. Spezialisierte Hautdrüsen sind besonders gut entwickelt bei den Wiederkäuern und werden als „Klauen-, Carpal-, Tarsal-, Metatarsal-, Präorbital-, Inguinal-, Postcornal-, Occipital-, Caudal-, Präputial- und Unguiculardrüsen" unterschieden.

Sehr merkwürdig ist eine tubulöse Drüse, welche beim Männchen von Echidna und Ornithorhynchus ausgebildet ist, bei ersterer Form im Kniegelenk, bei letzterer unter der Hüftgegend liegt, und in einem Sporn ausmündet, der an der Hinterseite des Tarsus der Hinterextremitäten sitzt. Das Sekret ist giftig und gleicht in seiner Wirkung dem Schlangengift, doch ist kein Fall bekannt, daß diese Tiere den Sporn als Waffe benutzt hätten. Vielleicht steht die Drüse mit dem Begattungsakt in Beziehung. Beim Weibchen ist dieser Drüsenapparat rückgebildet.

Wir kommen nunmehr zu einer Gruppe von Drüsen, die nur den Säugetieren zukommen und deren **Mammarapparat** bilden.

Der Name Säugetiere beruht auf dem Vorhandensein dieses besonderen drüsigen Apparates, welcher ein ernährendes Sekret, die Milch, absondert, das von den Jungen aufgenommen wird. Nach neuerer Annahme sind die Drüsen des Mammarapparates der Monotremen andere als die der übrigen Säugetiere, jedenfalls sind sie nicht die direkten Vorläufer der letzteren, sondern beide sind als divergente Entwickelungsformen ein und derselben indifferenten tubulösen Hautdrüsenart aufzufassen, aus welcher zugleich die Schweißdrüsen sich herausgebildet haben. Andere Forscher dagegen nehmen auf Grund des acinösen Baues der Milchdrüsen an, daß sie aus stärker entwickelten Talgdrüsen hervorgegangen sind. Fast stets treten die Einzeldrüsen zu größeren Komplexen zusammen und bilden bei den Monotremen ein flaches ovales Drüsenpaket, das sich auf der Bauchseite des Tieres entweder in einem zeitweise erscheinenden Beutel (Echidna) oder frei auf der Oberfläche (Ornithorhynchus) öffnet. Bei den Beutlern und Monodelphiern kommt es zu einer Weiterentwickelung dadurch, daß die Mammardrüsen in größerer Zahl auftreten. Sie erstrecken sich alsdann auf die beiden Seiten des Bauches von der Inguinalregion bis zur Brust oder Achselhöhle und können bei späterer Reduktion entweder in der Brustgegend (z. B. Affen) oder der Inguinalgegend (viele Huftiere) erhalten bleiben. Im großen und ganzen geht die Zahl der Mammardrüsen parallel mit der Zahl der Jungen eines Wurfes. Die höchste Anzahl erreicht Centetes mit 11 Paaren und bei Didelphis Henseli finden sich sogar 27 Zitzen. Da die Monotremen noch eierlegend sind, muß sich die rein vivipare Entwickelung erst innerhalb des Säugerstammes entwickelt haben, und man kann mit **Breßlau** annehmen, daß sich bei den Weibchen der ältesten Säugetiere eine Hautfalte in der Gegend der hinteren Bauchhälfte ausbildete, wodurch eine taschenartige Vertiefung — ein Beutel — entstand. In diesem Beutel, wie er bei der weiblichen Echidna wenigstens zeitweise auftritt, konnte das Ei und später das ausgekrochene Junge geborgen werden. Ein von den dort gelegenen Hautdrüsen geliefertes Sekret wurde von den Jungen als Nahrung benutzt, und damit kam es zur stärkeren Ausbildung und Vereinigung dieser Drüsen, damit also zur Herausbildung der Milchdrüsen. Wie **Breßlau** annimmt, stammen die Mammarorgane der Säugetiere von primitiven Brutorganen ihrer Vorfahren, ähnlich den Brutflecken vieler Vögel. Unter diesen paarig an der Bauchseite gelegenen Brutorganen fehlte die sonst sich ausbreitende Hautmuskulatur, und unter dem Einflusse des Bebrütens kam eine Einsenkung dieser Gegend zustande, welche zu einem Bergeplatze für das bebrütete Ei und später für das Junge wurde. Damit wäre die Herkunft des Beutels erklärt. Die Drüsen dieses Bezirkes bildeten sich unter der erhöhten Beanspruchung zu Milchdrüsen aus. Es ist nach dieser Hypothese der Mammarapparat der Säugetiere nicht als eine Neubildung aufzufassen, sondern entstanden in engem Anschluß an Zustände, die im Dienste der Brutpflege bei den

eierlegenden Vorfahren der Säugetiere ausgebildet waren. Die Weiterentwickelung des Mammarapparates ist nun bei den Beuteltieren so erfolgt, daß sich bei den weiblichen Tieren der Beutel fast allgemein auf der kaudalen Bauchseite erhält, und daß die Milchdrüsen annähernd kreisförmig auf der Bauchwand des Beutels angeordnet sind. Ferner senken sich die Drüsenfelder zu den sogenannten Zitzentaschen ein, und bei Beginn der Milchabsonderungsperiode wird der Boden dieser Zitzentasche, der oft schon eine kleine Papille trägt, auf welcher die Milchgänge ausmünden, hervorgestülpt, und diese umgestülpten Zitzen ermöglichen nun dem Jungen das Saugen. Das sehr frühzeitig geborene Junge soll vermittelst seiner scharfkralligen Vorderextremitäten an der Bauchwand der Mutter entlang klettern und somit selbständig in den Beutel gelangen. Auch nimmt man an, daß die Milch von seiten der Mutter dem Jungen ins Maul injiziert wird, so daß ein eigentliches Sauggeschäft nicht stattfindet.

Bei manchen Monodelphiern erfolgt die erste Anlage des Mammarapparates in Epithelverdickungen, welche jederseits am Bauche entlang ziehen und als „Milchleisten" bezeichnet werden. Man hat diese Anlagen mit den Beuteltaschen der Marsupialier in Verbindung gebracht, doch dürfte diese Ansicht nicht haltbar sein. Wie bei den Beuteltieren so ist auch bei den Monodelphiern die Zitzenentwickelung in paralleler und unabhängiger Weise vor sich gegangen; entweder bildet sich die Zitze durch eine Art Hervorstülpung der Zitzentasche, wie das auch bei den meisten Marsupialiern der Fall ist, oder es erhebt sich das gesamte, die Zitzentasche tragende Hautfeld, wodurch diese an die Spitze der sich bildenden Zitze erhoben wird, und mehr oder weniger verkümmert. Ob aber der weite Gang der Wiederkäuerzitze, der als Strichkanal bezeichnet wird, die Zitzentasche selbst darstellt, wie früher angenommen wurde, ist sehr fraglich, vielmehr scheint es nur der erweiterte Ausführgang der eigentlichen Milchdrüsen zu sein. Mammarorgane finden sich bei beiden Geschlechtern vor, wenn sie auch nur beim Weibchen zu voller Funktionsfähigkeit gelangen. Man hat die Annahme gemacht, daß auch die Männchen der Säugetiervorfahren Anteil an dem Brutgeschäft nahmen und ebenfalls jene Brutorgane besaßen, aus denen sich dann die Mammarorgane herausgebildet haben. Als Beweis dafür wird u. a. die Tatsache ins Feld geführt, daß bei den Monotremen die Mammarorgane bei beiden Geschlechtern noch ziemlich gleichmäßig ausgebildet sind. Doch ist es wahrscheinlicher, daß die Tatsache des Vorkommens rudimentärer Mammarorgane beim Männchen durch „amphigone Vererbung" zu erklären ist; es handelt sich also in diesem Falle nur um die Uebertragung eines ursprünglich nur bei einem Geschlecht angelegten Organes auf das andere Geschlecht.

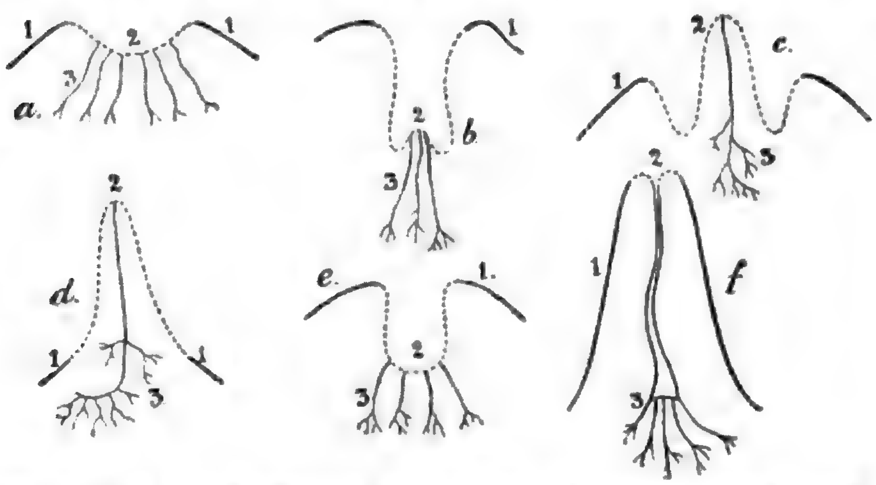


Fig. 5. Die phylogenetische Entwickelung der Zitzen. Schematisch. a Echidna, b Halmaturus vor der Laktation, c Didelphys vor, d zur Zeit der Laktation, e embryonales, f erwachsenes Rind, 1 Cutiswall, 2 Drüsenfeld, 3 Milchgänge. Aus Weber.

2b) Skelett. Das Skelett der Säugetiere ist stets ein Endoskelett, und nur bei wenigen Formen finden sich daneben knöcherne Hautplatten als Reste eines Exoskeletts. Die Ossifikation der Knochen ist eine sehr vollständige und der Knorpel ist bei erwachsenen Tieren stark reduziert. Während bei kleinen Säugetieren die Knochen kompakte Massen bleiben können, sind sie bei größeren Formen mehr maschig aufgebaut, und die in ihnen vorkommenden Hohlräume wandeln sich in von Blutgefäßen und Bindegewebe durchzogene Kanäle um, die als Haversische Kanäle bezeichnet werden. In den langen Knochen, wie sie in den Extremitäten vorkommen, ist ein Mittelstück, die Diaphyse, von den beiden Endstücken, den Epiphysen, zu unterscheiden, welche für sich verknöchern, und während des Wachstums der Knochen eine Knorpelzone nach der Diaphyse zu übrig lassen. Ferner bleibt ein Ueberzug der Gelenkfläche zeitlebens in knorpeligem Zustande übrig. Im Innern der Knochen kommt es zur Ausbildung einer schwammartig aufgebauten Knochensubstanz, die als „Spon-

giosa" bezeichnet wird und deren Hohlräume das Knochenmark enthalten. Diese Hohlräume können, wenn die Spongiosa schwindet, zu einem gemeinsamen großen Hohlraum zusammenfließen, und derartige Knochen werden als Röhrenknochen bezeichnet. Die Bälkchen der Spongiosa sind nicht regellos angeordnet, sondern im Zusammenhang mit der mechanischen Beanspruchung des Knochens, stehen also entsprechend der Richtung der Druck- und Zugkurven. Die Spongiosa findet sich auch in Schädelknochen und wird dann als Diploë bezeichnet. Auch hier kann sie schwinden und größere Hohlräume bilden, in die dann lufterfüllte Schleimhautsäcke der Nasenhöhle oder Paukenhöhle hineinwachsen können. Diese pneumatischen Knochen tragen zur Vergrößerung bestimmter Teile des Schädels bei, ohne dessen Gewicht zu vergrößern.

Wirbelsäule. Die Wirbelsäule besteht aus einer Anzahl einzelner und völlig verknöcherter Wirbel, die folgendermaßen gebaut sind. Der scheiben- oder walzenförmige Wirbelkörper stellt ein massives Gebilde dar, dessen Endflächen entweder völlig eben oder an der Hinterfläche etwas ausgehöhlt, an der Vorderfläche vorgewölbt sind. An diesen Wirbelkörper, der ursprünglich hyalinknorpelig ist, setzen sich die dorsalen Bogen auf. Die Chorda dorsalis kommt bei den Säugetieren nicht mehr zu größerer Ausbildung und erhält sich nur zwischen den Wirbelkörpern, also intervertebral. Hier findet sie sich als gallertiger Kern (Nucleus pulposus) in den Zwischenwirbelscheiben, welche aus faserig-knorpeliger Masse bestehen, und die einzelnen Wirbelkörper miteinander verbinden. Dadurch unterscheidet sich die Wirbelsäule der Säugetiere von der der Sauropsiden, bei denen die Wirbelkörper gelenkig miteinander verbunden sind. Die Verknöcherung der Wirbelkörper erfolgt sowohl von der Mitte als auch von beiden Seiten aus und letztere Knochenkerne, die Epiphysen, verwachsen erst später mit dem mittleren, dem Zentrum. Die Beweglichkeit der Wirbelsäule wird durch die elastischen Zwischenwirbelscheiben gewährleistet und ferner reguliert durch Bandapparate zwischen den einzelnen Wirbeln, sowie durch zwei Längsbänder, ein dorsales und ein ventrales, die der Wirbelsäule entlang ziehen. Gelegentlich kann auch teilweise oder völlige Verschmelzung von Wirbeln eintreten. Aus dem knorpeligen Zentrum gehen die oberen Bogenstücke, Neurapophysen, hervor, welche den zum Durchtritt des Rückenmarks bestimmten Wirbelkanal, Canalis vertebralis, bilden. An den oberen Bogenstücken sitzen vordere und hintere, schräg gerichtete Facetten, durch welche eine gelenkige Verbindung der aufeinander folgenden Wirbel erzielt wird, es sind das die Processus articulares oder Zygapophysen. Auch können bei manchen Formen akzessorische Gelenkflächen auftreten. Ferner sitzt der Vereinigung des linken und rechten oberen Bogenstückes je ein medianer Fortsatz auf, der als Dornfortsatz, Processus spinosus, bezeichnet wird.

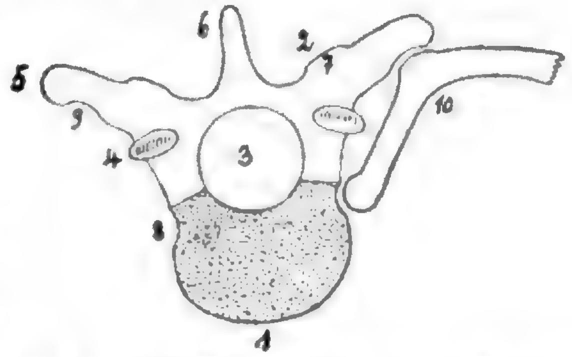


Fig. 6. Schema eines Brustwirbels. 1 Zentrum, 2 Neuralbogen, 3 Wirbelloch, 4 Processus articularis, 5 Processus transversus, 6 Processus spinosus, 7 Processus mammillaris, 8 Gelenkfacette für das Capitulum, 9 Gelenkfacette für das Tuberculum, 10 Rippe. Aus Weber.

Von den Seiten der oberen Bogenstücke oder auch vom Wirbelkörper selbst gehen die Querfortsätze, Processus transversi, aus, unter denen man sehr verschiedenartige Bildungen begreift. An den Brustwirbeln kann man einen dorsalen Fortsatz, die Diapophyse, von einem ventralen, der Parapophyse, unterscheiden. Ersterer trägt eine Fläche für die gelenkige Verbindung mit dem Rippenhöcker, letzterer, vom Wirbelkörper entspringend, bildet meist nur eine Gelenkfläche für den Gelenkkopf der Rippe. An den Lendenwirbeln verschmilzt vielfach die Diapophyse mit einer rückgebildeten Rippe, und dieses Produkt wird als „Seitenfortsatz" bezeichnet. Die Halswirbel tragen ebenfalls Querfortsätze, die aus der Verschmelzung eines Rippenrudiments mit der

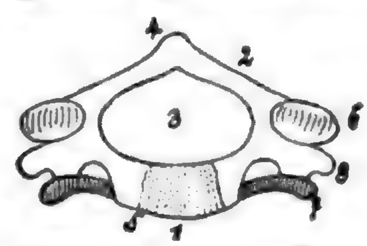


Fig. 7. Schema eines Halswirbels. 1 Zentrum, 2 Neuralbogen, 3 Vertebralloch, 4 Dornfortsatz, 5 neuro-zentrale Naht, 6 Gelenkfortsatz, 7 Processus costarius, 8 Diapophyse. Aus Weber.

Diapophyse und der Parapophyse entstehen. Ein dazwischen entstehendes Loch, das Foramen costo-transversarium, wird ganz oder teilweise von der Arteria vertebralis durchzogen.

Bei vielen Säugetieren finden sich an der Ventralseite der Schwanzwirbel untere Bogen, Hämapophysen, deren Enden in der Mittellinie verschmelzen. Wahrscheinlich sind sie homolog den unteren Bogen der Fische und Amphibien.

An der Wirbelsäule der Säugetiere lassen sich folgende stets scharf unterscheidbare Regionen feststellen: Hals-, Brust-, Lenden-, Kreuzbein- und Schwanzregion. Die Halswirbel sind fast immer in der Siebenzahl vorhanden, nur der Lamantin und eine Art Faultier (Choloepus Hoffmanni) haben 6, Bradypus dagegen 8 bis 10. Der erste Halswirbel, der Atlas, ist ein Knochenring mit je einer Gelenkfläche für die beiden Condylen des Schädels. Der Wirbelkörper des Atlas ist mit dem darunterliegenden zweiten Halswirbel, dem Epistropheus, verschmolzen und bildet dessen Zahnfortsatz, Processus odontoideus, um welchen die drehenden Bewegungen des Kopfes stattfinden, während die nickenden und seitlichen Bewegungen durch die Schädel-Atlasgelenke bewirkt werden. Der Atlas ist meist mit

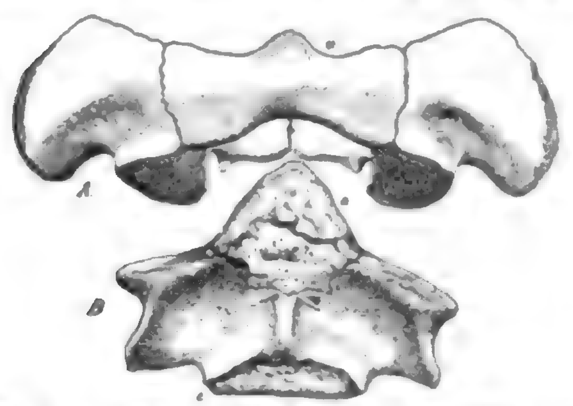


Fig. 8. Atlas (A) und Epistropheus (B) eines jungen Nashorns. v Ventrales Schlußstück des Atlas, o Zahnfortsatz, e distale Epiphyse des Epistropheus. Nach Weber.

kräftig entwickelten Diapophysen versehen. Die Brustregion besteht aus einer von 9 bis 24 variierenden Anzahl von Wirbeln, welche obere und untere Querfortsätze und daran eingelenkte bewegliche Rippen tragen. Die darauf folgenden rippenlos bleibenden Lendenwirbel sind meist 6 bis 7 an der Zahl. Der unterste Lendenwirbel kann sich gelegentlich mit den Wirbeln der Kreuzbeinregion verbinden, welche aus ein oder zwei mit dem Os ilium verbundenen echten Sakralwirbeln und einer wechselnden Zahl darauf folgender Schwanzwirbel besteht. So kann die Zahl der zum Kreuzbein verwachsenden Wirbel auf 7 bis 9 steigen (Wombat, Faultiere, Gürteltiere). Diese Verstärkung der Kreuzbeinregion dürfte in erster Linie durch eine kräftige Ausbildung der hinteren Extremitäten bedingt sein. Am stärksten schwankt die Zahl der Wirbel in der Schwanzregion, während sie bei Fledermäusen und manchen anthropoiden Affen wie den Gibbons nur 3 beträgt, finden sich bei einem Schuppentier (Manis macrura) 47 Schwanzwirbel. Besondere Verhältnisse liegen bei Walen und Sirenen vor, bei denen eine Sakralregion geschwunden ist, während die Funktion des Schwanzes als Lokomotionsorgan eine vollkommenere Ausbildung der Schwanzwirbel im Gefolge gehabt hat. Der Beginn der Schwanzwirbelregion bei den Walen ist übrigens nicht von der Ausbildung kräftiger ventraler Bogen an zu rechnen, sondern nach der Lage der vom Rückenmark abgehenden Nervenwurzeln, die den Plexus sacralis bilden, zu bestimmen, eine Arbeit, die noch aussteht.

Rippen. Die Rippen kommen nur in der Brustregion zu voller Ausbildung, in den anderen Regionen sind nur Rudimente anzutreffen, die mit den Querfortsätzen verschmolzen sind. Die Säugetierrippen sind homolog den „Lateralrippen" der Fische, nur die ventralen Bogen der Schwanzwirbel dürften den unteren, den „Hämalrippen" der Fische entsprechen. Meist ist die Zahl der Brustrippen 13, doch kann sie zwischen 9 und 24 schwanken. Während die vorderen Rippen sich mit dem Brustbein vereinigen, und daher wohl auch als „wahre Rippen" bezeichnet werden, erreichen die sogenannten „falschen Rippen" das Brustbein nicht mehr, und verbinden sich mit ihm nur indirekt oder gar nicht. Jede Rippe besteht aus einem vertebralen verknöcherten und einem sternalen, meist knorpelig bleibenden Teil. Die gelenkige Verbindung mit den Wirbelkörpern erfolgt durch ein Gelenkköpfchen, Capitulum, und zwar ist bei den vorderen Rippen eine sekundäre Verschiebung derart eingetreten, daß das Capitulum auch mit dem Hinterrande des vorausgehenden Brustwirbels gelenkige Verbindung bekommt. Außerdem ist noch eine zweite gelenkige Verbindung der Rippe mit der Diapophyse vorhanden, indem sich an der dorsalen Seite der Rippe der Rippenhöcker, Tuberculum, ausbildet.

Brustbein. Das Brustbein ist im wesentlichen ein Produkt der Rippen, indem deren Enden jederseits zu einem knorpeligen Streifen, den Sternalleisten, verschmelzen, die ihrerseits zu dem sogenannten Mesosternum zusammentreten. Auch in der alsdann beginnenden Verknöcherung erweist es sich als aus hintereinander gereihten Knochenkernen bestehend, die vielfach später zu einer einheitlichen Brustbeinplatte verwachsen. Kranialwärts bildet sich das Manubrium aus, während kaudalwärts der „Schwertfortsatz" (Xiphisternum) erscheint, der bei manchen Formen sehr lang werden kann (Manis tricuspis). Im Manubrium ist außer dem primären

Sternum, wie es bei den Sauropsiden auftritt, bei Monotremen auch noch das Episternum, wahrscheinlich ursprünglich ein Deckknochen, enthalten. Der Brustkorb der Säuger, der von Brustbein, Rippen und dazu gehörigen Wirbeln gebildet wird, ist im allgemeinen von herzförmigem Querschnitt, der bei schwimmenden, fliegenden, grabenden und kletternden Tieren queroval werden kann, ebenso auch bei Formen mit aufrechter Körperhaltung.

Extremitäten. Schultergürtel. Wie die anderen Tetrapoden, so haben auch die Säugetiere zwei Paar Extremitäten, von denen bei einigen wasserlebenden Formen (Wale, Sirenen) die hinteren rudimentär werden und schwinden. Die Verbindung des Skeletts der vorderen Extremität mit dem Achsenskelett wird bewirkt durch den Schultergürtel, in dem man einen primären und einen sekundären Teil unterscheiden kann. Der primäre ist zunächst eine einheitliche Knorpelanlage, in deren Mitte die Gelenkpfanne für den Oberarm entsteht, wodurch sie in einen dorsalen Teil, das Schulterblatt, Scapula, und einen ventralen Teil, das Coracoid, zerfällt. In letzterem bilden sich zwei Skelettelemente aus, das kaudal gelegene Metacoracoid und das kranial gelegene Epicoracoid, welches letztere bei den Monotremen sich mit dem Episternum des Brustbeines verbindet. Auch das Metacoracoid,

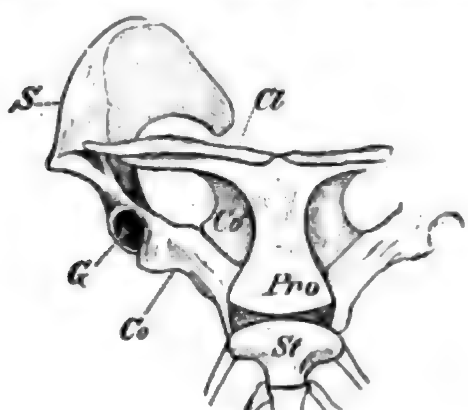


Fig. 9. Schultergürtel vom Schnabeltier. Cl Clavicula, Co Coracoid, Co[1] Epicoracoid, G Gelenkpfanne für den Humerus, Pro Prosternum, S Scapula, St Sternum. Aus Wiedersheim.

welches sich an der Bildung der Gelenkpfanne für den Oberarm beteiligt, erreicht das Brustbein. Durch Reduktion des Metacoracoids bei den höheren Säugetieren wird es zum Processus coracoideus, der mit dem Schulterblatte verschmilzt und das Brustbein nicht mehr erreicht. Der sekundäre Abschnitt des Schultergürtels ist das Schlüsselbein, Clavicula, ursprünglich ein Hautknochen, der als schwach „S"-förmig gebogener schmaler Knochen, Schulterblatt und Brustbein verbindet. Bei vielen Säugetieren (Ungulaten, Carnivoren u. a.) geht die Clavicula wieder verloren. Das Schulterblatt stellt meist eine dreieckige Platte dar, an deren Außenfläche sich ein Kamm, Spina scapulae, erhebt, der im Acromion endigt.

Beckengürtel. Während die Verbindung des Skeletts der Vorderextremität mit dem Achsenskelett eine indirekte ist, ist das der Hinterextremität durch den Beckengürtel unmittelbar mit der Wirbelsäule verbunden. Auch am Beckengürtel sind 3 Skelettelemente vorhanden, Darmbein (Ilium), Schambein (Pubis) und Sitzbein (Ischium). Das Säugetierbecken zeichnet sich durch die besondere Stellung der Darmbeine aus, die von ihrer Insertion am Kreuzbein schief nach hinten und ventral ziehen. Alle 3 Beckenknochen verbinden sich fest zu dem Hüftbein. Schambein und Sitzbein lassen zwischen sich eine Oeffnung, das Foramen obturatum. Die Gelenkpfanne für die Oberschenkel wird meist nur vom Darmbein und Sitzbein geliefert, wozu noch ein kleiner, vielleicht sekundärer Knochen, das Os acetabuli, kommt. An der Außenfläche des Iliums verläuft ein längsgerichteter Knochenkamm. Beide Hüftbeine stoßen ventral in der Symphyse zusammen, an der sich ursprünglich Scham- und Sitzbeine beteiligen, bei vielen Formen aber auch nur erstere in verschieden hohem Grade. Die Befestigung

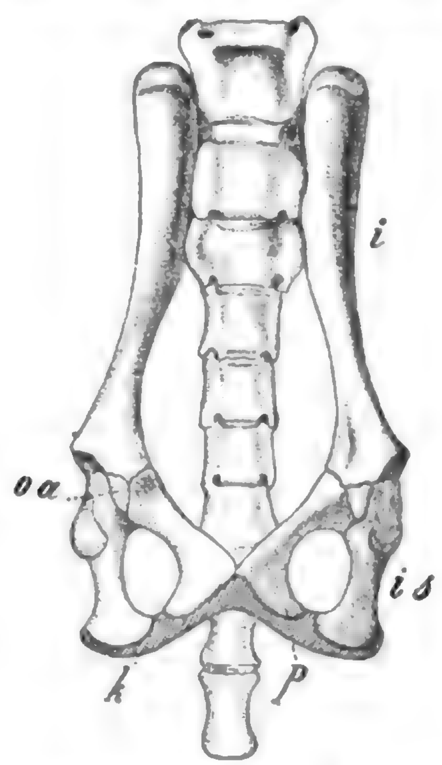


Fig. 10. Ventralansicht des Beckens von Galeopithecus. i Ilium, is Ischium, p Pubis, oa Os acetabuli, k Knorpel. Nach Leche. Aus Weber.

der Hüftbeine an die Wirbelsäule erfolgt so, daß das Darmbein teils durch ein sogenanntes straffes Gelenk mit ein oder zwei Sakralknorpeln verbunden ist, teils durch starke Bänder, die zu den kaudalen Wirbeln des Kreuzbeines ziehen.

Bei den Monotremen und Marsupialiern senden die Schambeine von ihrem Vorderrand 2 kranialwärts gerichtete Beutelknochen aus, die zur Unterstützung des Beutels dienen, und aus den Epipubes der Anamnia entstanden sind. Bei Sirenen und Walen sind die Beckenknochen stark rückgebildet, bei letzteren zu einem einfachen Knochenstab reduziert, der keine Beziehungen zur Wirbelsäule hat. Diese Knochen sind bei den Zahnwalen die Rudimente der Sitzbeine, die nur deshalb nicht völlig verschwinden, weil sie dem Penis als Stütze dienen, indem sie beim Einkrümmen des Schwanzes durch einen kräftigen Sehnengurt festgestellt werden. Die Begattung der Wale muß also schon aus anatomischen Gründen so erfolgen, daß das männliche Tier den Schwanz stark einkrümmt.

Freie Gliedmaßen. Die freien Gliedmaßen der Säugetiere weisen sehr verschiedenartige Anpassungen an die Lebensweise auf. Dennoch finden sich im großen und ganzen die gleichen Skelettelemente in annähernd gleicher Anordnung wieder. Die Stellung von Vorder- und Hinterextremitäten ist bei den Säugetieren eine antagonistische, indem bei ersterer der Winkel von Oberarm und Unterarm nach vorn offen ist, während das Knie der Hinterextremität nach vorn schaut. Demgemäß steigt im Schultergelenk der Oberarm nach hinten ab, im Hüftgelenk der Oberschenkel nach vorn. Diese Knochenstellung hängt aufs innigste mit der Funktion der Extremitäten zusammen, von denen die vordere den Körper nach vorwärts zieht, die hintere ihn vorwärts schiebt. Beiden Extremitätenpaaren ist mancherlei gemeinsam, und die einzelnen Skelettelemente der Vorderextremitäten finden sich in der Hinterextremität wieder.

Vorderextremitäten. Der Oberarm, Humerus, trägt einen halbkugeligen Gelenkkopf und stellt sich als ein langgestreckter Knochen dar, dessen distales Ende verbreitert ist und mit dem Vorderarm das Ellenbogengelenk bildet. Der Vorderarm ist aus Elle (Radius) und Speiche (Ulna) zusammengesetzt. Durch die Stellungsänderung des Oberarms nach hinten wurde eine Verschiebung der proximalen Enden von Elle und Speiche bewirkt, derart, daß bei der Mehrzahl der Säugetiere erstere schief nach außen aufsteigt und dabei das Proximalende der Speiche kreuzt, während distalwärts die Enden beider Knochen ihre ursprüngliche Stellung behalten. Die Anpassung der Vorderextremität an Klettern und Greifen äußert sich in einer größeren Beweglichkeit der Unterarmknochen, indem das distale Ende der Elle sich um das der Speiche herumzubewegen vermag, so daß die ventrale Handfläche nach innen oder dorsalwärts gerichtet werden kann (Supinationsstellung im Gegensatz zur ursprünglichen Pronationsstellung). Der auf den Unterarm folgende Abschnitt ist der Carpus, dessen Skeletteile sich in 2 transversale Reihen anordnen lassen. In der ersten Reihe liegen 3, in der zweiten ursprünglich 5 Elemente, zwischen denen sich noch 1 oder 2 Centralia einfügen. Schematisch läßt sich die Anordnung folgendermaßen darstellen.

Radius Ulna
Radiale Intermedium Ulnare
Centrale
Carpale 1 Carpale 2 Carpale 3 Carpale 4+5

Dazu kommen noch an der ulnaren Seite das Erbsenbein, Pisiforme, an der radialen der Präpollex, die vielfach als Reste ehemaliger weiterer Strahlen aufgefaßt werden, die auf fischähnliche Vorfahren der Tetrapoden deuten. An die distalen Carpalia schließen sich als lange Knochen die Metacarpalia und Phalangen der Finger, und zwar finden sich am ersten Finger stets 2 Phalangen, an allen anderen 3. Nur bei den Walen tritt eine sekundäre

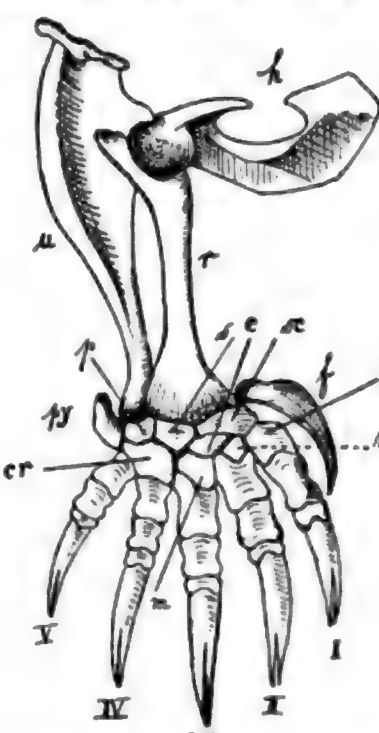


Fig. 11. Vorderextremität des Maulwurfs. c Zentrale, cr Hamatum, f Os falciforme, h Humerus, m Carpale 3, p Ulnare, py Pisiforme, r Radius, s Intermedium, sc Radiale, tr Carpale 1, tz Carpale 2, u Ulna. Nach Weber.

Vermehrung der Phalangenzahl (Hyperphalangie) auf.

Einzelne Säugetiergruppen zeigen eine sehr tiefgreifende Umgestaltung der Vorderextremität, so die Artiodactylen, bei denen nur der dritte und der vierte Finger funktionieren, während bei den Perissodactylen der dritte Finger sich am stärksten entwickelt. Andere Umformungen werden durch Anpassung an die schwimmende, fliegende oder grabende Lebensweise hervorgerufen. Bei kletternden Tieren kann Daumen wie große Zehe opponierbar werden, so daß Greifhände und Greiffüße entstehen. Auch finden sich Verschiedenheiten, je nachdem Fuß und Hand völlig dem Boden aufgelagert sind (Sohlengänger) oder nur mit den Phalangen (Zehengänger). Ruht schließlich das Körpergewicht nur auf der Spitze der letzten Phalanx, resp. auf deren Hornbekleidung, so sprechen wir von Unguligraden.

Hinterextremität. In der Hinterextremität finden wir als Ausdruck weitgehender Homonomie im wesentlichen die gleichen Knochen wie in der vorderen Extremität. Wie der Oberarm so trägt auch der Oberschenkel proximal einen Gelenkkopf, während er distal in zwei Condylen endigt, mit denen Schienbein (Tibia) und Wadenbein (Fibula) gelenkig verbunden sind, die parallel nebeneinander liegen. Vorn am Kniegelenk ist in die Sehne eines Muskels ein großes Sehnenbein, die Kniescheibe, Patella, eingebettet. Die Fußwurzel, Tarsus, wird von 2 proximalen und 4 distalen Knochenstücken gebildet, zwischen die sich, wie im Carpus, ein Centrale einschiebt. Beifolgendes Schema soll die Lagerung der Tarsalia veranschaulichen:

Tibia			Fibula
Tibiale + Intermedium (Talus oder Astragalus)			Fibulare (Calcaneus)
	Centrale (Naviculare)		
Tarsale 1	Tarsale 2	Tarsale 3	Tarsale 4+5

Der Astragalus artikuliert mit der Tibia, der Calcaneus bildet einen oft weit vorspringenden Fersenhöcker zur Befestigung der Achillessehne. Die Phalangenzahlen sind die gleichen wie in der Hand. Die Umbildungen des Skeletts der Hinterextremitäten sind die gleichen wie die der Vorderextremitäten

Schädel. Der Schädel der Säugetiere hat einige Merkmale mit dem der Amphibien gemein, schließt sich aber in anderen an den Schädel primitiver Sauropsiden an. Der Gehirnschädel ist eng mit dem Gesichtsschädel verbunden, und die Scheidung beider Bestandteile wird dadurch erschwert.

Das Hinterhauptsloch, welches zu der Schädelbasis in einem verschieden großen Winkel liegt, und nur beim Menschen in etwa der gleichen Ebene, ist umgeben von 4 Knochen, dem Basioccipitale, den beiden Exoccipitalia und dem Supraoccipitale. Wie die Amphibien, so haben auch die Säugetiere zwei Gelenkhöcker am Schädel, mittels deren die Verbindung mit der Wirbelsäule erfolgt, während bei den Sauropsiden nur ein Condylus occipitalis vorhanden ist. Die beiden seitlichen Gelenkhöcker des Säugetierschädels sind vorwiegend von den beiden Exoccipitalien gebildet, doch können sie sich auch bei manchen Arten auf das Basioccipitale ausdehnen. Man hat versucht, die 2 Gelenkhöcker der Säugetiere von einem dreiteiligen Gelenkhöcker der Sauropsiden abzuleiten, indem der auf dem Basioccipitale gelegene Anteil dieses unpaaren Gelenkhöckers geschwunden sein soll, oder man hat einen quernierenförmig gestalteten Condylus, wie er bei manchen Reptilien auftritt, zum Ausgangspunkt genommen. Gegen eine direkte Ableitung von den 2 Condylen der Amphibien spricht der Umstand, daß die drei ersten Wirbel der Amphibien in den Schädel der Amnioten einbezogen worden sind, so daß die Grundlage, von der aus sich die Condylen entwickeln bei Amphibien einerseits, Sauropsiden und Säugern andererseits eine verschiedene ist. Die Exoccipitalia tragen außer den großen etwas schräg nach unten konvergierenden Condylen noch meist einen verschieden ausgebildeten, absteigenden Fortsatz, den Processus paramastoideus oder paroccipitalis. Meist sind die 4 Knochen der Occipitalregion fest miteinander verwachsen. Auf die Occipitalregion folgt nach vorn zu die Parietalregion, aus 5 Knochen gebildet. An der Basis liegt das Basisphenoid, seitlich davon die Alisphenoide und das Dach wird von beiden Scheitelbeinen, den Parietalia, gebildet. In der oberen Fläche des Basisphenoids findet sich eine oft ansehnliche Grube zur Aufnahme eines Hirnanhanges, der Hypophyse, und diese Grube wird der Türkensattel, sella turcica, genannt. Zwischen den Scheitelbeinen und dem Supraoccipitale ist vielfach ein unpaarer oder auch paariger Knochen eingeschoben: das Interparietale, das meist mit dem Supraoccipitale oder dem Scheitelbein verwächst, aber auch gesondert erhalten bleiben kann. Bei den Cetaceen hat, wohl veranlaßt durch den beim Vorwärtsschwimmen entstehenden Druck des Wassers eine Verschiebung der Parietalia durch Verkürzung des Hirnschädels in der Längsachse stattgefunden und die beiden Scheitelbeine stoßen nicht mehr in der dorsalen Mittellinie zusammen, sondern sind durch die in Berührung tretenden Stirnbeine einerseits, das Supraoccipitale samt damit verschmolzenem Interparietale andererseits zur Seite gedrängt.

Die dritte Region ist die Frontalregion. An der Basis liegt das Präsphenoid, mit seinen beiden seitlichen Flügeln, den Or-

bitosphenoiden. Meist sind letztere mit dem unpaaren Präsphenoid verwachsen, wie auch die dahinter liegenden Alisphenoide mit dem Basisphenoid verwachsen können. Außerdem kann aber auch das Präsphenoid

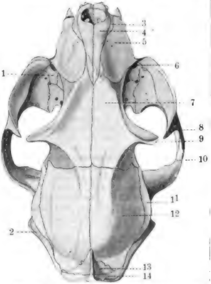


Fig. 12. Schädel der Hauskatze von oben. 1 Lacrymale, 2 Processus mastoideus, 3 Prämaxillare, 4 Nasale, 5 Maxillare, 6 Canalis lacrymalis, 7 Frontale, 8 Jugale, 9 Processus postorbitalis, 10 Processus zygomaticus, 11 Squamosum, 12 Parietale.

mit dem Basisphenoid verwachsen, so daß ein einheitliches Keilbein mit zwei vorderen und zwei hinteren Flügeln entsteht, wie z. B. beim Menschen. Die Decke der Frontalregion wird von den beiden Stirnbeinen, Frontalia, gebildet, die zuweilen frühzeitig miteinander verwachsen.

Zwischen die Occipital- und die Parietalregion schiebt sich zu beiden Seiten in der Ohrregion ein Knochenkomplex ein. Der Hauptbestandteil desselben ist das Felsenbein, Os petrosum oder Perioticum, das im wesentlichen dem Prooticum der Reptilien entspricht, und welches das Labyrinth völlig umschließt. Eine besonders verknöchernde Partie ist das Mastoid, welches nach hinten und nach außen davon liegt, und mit dem das Labyrinth umschließenden Teil verwächst. Das Perioticum der Säugetiere ist aus der ursprünglich seitlichen Lage, wie sie das Prooticum der Reptilien einnimmt, gegen die Schädelbasis gedrängt, und diese Verlagerung wird auf die Zunahme des Gehirns zurückgeführt. An das Perioticum schließen sich zwei weitere Knochen an, das Tympanicum und das Squamosum. Das Tympanicum erscheint, bei manchen

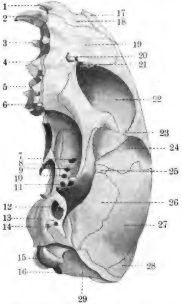


Fig. 13. Schädel der Hauskatze von der Seite. 1 Schneidezahn, 2 Eckzahn, 3 Erster Prämolar, 4 Zweiter Prämolar, 5 Dritter Prämolar, 6 Molar, 7 Foramen opticum, 8 Pterygoid, 9 Foramen lacerum anterius, 10 Foramen rotundum, 11 Foramen ovale, 12 Meatus auditorius externus, 13 Bulla ossea, 14 Foramen stylomastoideum, 15 Condylus occipitalis, 16 Foramen magnum, 17 Nasale, 18 Prämaxillare, 19 Maxillare, 20 Foramen infraorbitale, 21 Canalis lacrymalis, 22 Orbita, 23 Processus postorbitalis, 24 Schläfengrube, 25 Alisphenoid, 26 Squamosum, 27 Parietale, 28 Interparietale, 29 Supraoccipitale.

besonders niederen Säugern als ein unvollständiger Knochenring, Annulus tympanicus, in dem das Trommelfell ausgespannt ist, und so legt es sich auch embryonal an. Es wird vom Quadratojugale der Sauropsiden abgeleitet. Eine Weiterbildung erfolgt in der Weise, daß es sich zu einem vollständigen Ring schließt, der sich mit Unterstützung des Petrosum zum knöchernen Gehörgang, Meatus auditorius externus ausbildet, während der innere Teil des Tympanicum sich an das Petrosum anlegt, und mit diesem zusammen die Paukenhöhle, cavum tympani,

bildet, in welcher die Gehörknöchelchen liegen. Indem dieser Teil des Tympanicum blasig anschwillt, kommt es zur Ausbildung einer meist dünnwandigen Blase, der Bulla ossea. An der Bildung dieser können sich aber auch noch andere Skelettelemente beteiligen. Bei den Walen tritt der aus dem verschmolzenen Petrosum und Tympanicum gebildete sehr feste „Hörknochen“ aus dem Zusammenhange mit dem benachbarten

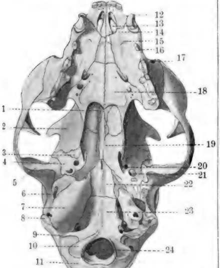


Fig. 14. Schädel der Hauskatze von der Basis. 1 Vomer, 2 Frontale, 3 Orbitosphenoid, 4 Alisphenoid, 5 Fossa glenoidalis, 6 Meatus auditorius externus, 7 Bulla ossea, 8 Processus mastoideus, 9 Processus paroccipitalis, 10 Condylus occipitalis, 11 Supraoccipitale, 12 Eckzahn, 13 Foramen incisivum, 14 Prämaxillare, 15 Maxillare, 16 Prämolar, 17 Foramen infraorbitale, 18 Palatinum, 19 Präsphenoid, 20 Foramen rotundum, 21 Foramen ovale, 22 Basisphenoid, 23 Basioccipitale, 24 Foramen magnum.

Knochen der Schädelbasis heraus und liegt ventral von ihr lose in dem Ligamentgewebe. Diese Erscheinung ist auf eine besondere Anpassung an das Hören im Wasser zurückzuführen.

Der dritte Bestandteil der Ohrregion ist das Squamosum, welches von dem Squamosum der Sauropsiden abzuleiten ist. Der Anteil, welchen das Squamosum an der Bildung der Schädelkapsel selbst nimmt, ist ein sehr verschieden großer. Dieser Schuppenteil des Squamosum schiebt sich dabei zwischen Parietale, Perioticum und Alisphenoid ein. Von der Außenfläche entspringt der Jochfortsatz, Processus zygomaticus, der mit einem besonderen Knochen, dem Jugale und einem entsprechenden Fortsatz des Maxillare den Jochbogen liefert. Ferner ist noch das Squamosum beteiligt an der Bildung des Unterkiefergelenkes der Säugetiere, indem es die Gelenkfläche (Fossa glenoidea) für den Unterkiefer trägt. Bei einigen Säugern, so dem Menschen, verwachsen Squamosum einerseits und das Perioticum-Tympanicum andererseits miteinander zum „Schläfenbein“ (Os temporale). Der Jochbogen fehlt nur bei einigen Insektivoren völlig oder ist unvollständig wie bei Ameisenbären und Schuppentier. Auch kann das Jugale fehlen, so daß dann der Jochbogen von den beiden Fortsätzen des Squamosum und des Maxillare gebildet wird.

Der Hintergrund der Augenhöhle wird vom Orbitosphenoid, in geringerem Maße auch vom Alisphenoid gebildet. Am medialen Orbitalrand liegt ein besonderer Knochen, das Tränenbein, Lacrymale, welches dem Präfrontale der Saurier entspricht.

Nach vorn von der das Gehirn umschließenden Schädelkapsel liegen die **Nasenhöhlen**, die von der Hirnhöhle durch das Ethmoideum abgegrenzt werden. Dieses sendet eine mediane Nasenscheidewand (Mesethmoid) aus, welche die Nasenhöhle in zwei Teile zerlegt. Die Verknöcherung tritt ein im hinteren Teile des Mesethmoids, der Lamina perpendicularis, und in dem Abschluß der Nasenhöhle gegen die Hirnhöhle. Diese beiden jederseits schief aufsteigenden Platten sind von zahlreichen Löchern durchbohrt, durch welche die Riechnervenfäden hindurchtreten, und heißen Siebplatten. Durch Verschmelzung mit der Lamina perpendicularis bilden sie das Siebbein (Ethmoid).

An der hinteren Seitenwand der knorpeligen Nasenkapseln entstehen in den Nasenraum vorspringende, durch knorpelige, später verknöchernde Lamellen gestützte Schleimhautfalten, die Riechmuscheln (Ethmoturbinalia). Die erste derselben gewinnt vorn mit dem Nasale Verbindung und setzt sich nur im hinteren Abschnitt mit dem Ethmoid in Verbindung; sie wird daher als Nasoturbinale unterschieden. Meist sind die Ethmoturbinalia eingerollt. Das Dach der Nasenhöhle bilden die beiden Nasalia, deren Länge sich nach der Schnauzenentwickelung richtet. Bei den Walen sind sie, entsprechend der Verlagerung der Nasenöffnung scheitelwärts, sehr verkürzt. Auch das Lacrymale beteiligt sich an der knöchernen Wandung der Nasenhöhle und schiebt

sich im vorderen inneren Winkel der Orbita zwischen den äußeren Rändern der Frontalia und Nasalia ein. Fast stets ist es von einem Kanal, dem Tränengang, durchbohrt. Ferner

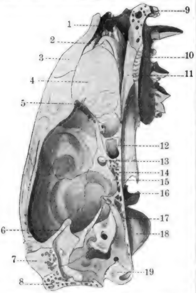


Fig. 15. Schädel der Hauskatze im Medianschnitt. 1 Maxillaturbinale, 2 Ethmoturbinale, 3 Nasale, 4 Mesethmoid, 5 Lamina cribrosa, 6 Tentorium, 7 Interparietale, 8 Supraoccipitale, 9 Prämaxillare, 10 Maxillare, 11 Vomer, 12 Präsphenoid, 13 Foramen opticum, 14 Basisphenoid, 15 Sella turcica, 16 Processus postglenoidalis, 17 Basioccipitale, 18 Bulla ossea, 19 Exoccipitale.

kommt für die Nasenregion der Oberkiefer (Maxillare) in Betracht, der die Seitenwand der Nasenhöhle mit aufbaut, und nach innen die untere Nasenmuschel, Maxilloturbinale, entsendet.

Kiefergaumenapparat. Wir kommen nunmehr zu der Besprechung des als Kiefergaumenapparat bezeichneten Schädelteiles. Das Maxillare beteiligt sich außer an der Bildung des Orbitalgrundes auch an der Bildung des knöchernen Gaumens, ebenso wie das Intermaxillare. Beide Zwischenkiefer umgrenzen vorn und seitlich die Nasenöffnungen, sich zwischen Maxillare und Nasale einschiebend und mitunter bis zum Frontale reichend. Auch nehmen sie durch horizontale Fortsätze Anteil an der Bildung des vorderen knöchernen Gaumens. Weiter hinten wird der knöcherne Gaumen gebildet von den Gaumenbeinen (Palatina), welche den sekundären Nasenrachengang nach hinten verlängern. Zwischen die aufsteigenden Lamellen der Palatina schiebt sich der unpaare Vomer ein. An der Umrandung der Choanenöffnung nehmen auch Teil die Pterygoide, die sich als dünne senkrechte Knochenlamellen den Pterygoidfortsätzen der Alisphenoide innen und weiter vorn den senkrechten Lamellen der Palatina anlegen.

Unterkiefer. Der Unterkiefer besteht aus zwei durch die Symphysis mandibularis innig verbundenen Hälften. Der obere Rand, Alveolarrand, trägt die Zähne. Hinten findet sich der Processus condyloideus, der den meist stark transversal entwickelten Condylus bildet. Davor steigt meist ein Fortsatz in die Höhe, zur Insertion des Schläfenmuskels, der Processus coronoideus. Ein hinterer Fortsatz, der besonders bei niederen Säugern entwickelt ist, heißt Processus angularis. Der Condylus lenkt sich in die Fossa glenoidalis des Squamosum ein, an deren Bildung sich aber auch Jugale und Alisphenoid beteiligen können.

Während sich bei den anderen Vertebraten der Unterkiefer aus mehreren Skelettelementen zusammensetzt, von denen das Artikulare durch Vermittelung des Quadratum mit dem Schädel zusammentritt, besteht der Unterkiefer der Säugetiere nur aus einem Skelettstück, dem Dentale der niederen Vertebraten entsprechend, und ihr Kiefergelenk ist eine Neubildung. Artikulare und Quadratum sind nach der Ansicht von Reichert u. a. bei den Säugetieren in die Paukenhöhle gewandert, und bilden dort den Hammer und den Amboß. Das Hammer-Amboßgelenk entspricht also dem Kiefergelenk der Vertebraten mit Ausnahme der Säugetiere, deren Kiefergelenk eine von Squamosum und Dentale gelieferte Neubildung ist. Das dritte Gehörknöchelchen, der Steigbügel wird vom oberen Abschnitt des zweiten Kiemenbogens, dem Hyomandibulare abgeleitet, und ist wenigstens teilweise der Columella der übrigen Tetrapoden homolog. Zurückgeführt wird diese Umbildung des Kiefergelenkes, auf das erst bei Säugern auftretende Tympanicum, welches von dem embryonal noch einheitlich auftretenden ventralen Teil des ersten Kiemenbogens, des Kieferbogens, dessen hinteren dem Artikulare entsprechenden Teil abtrennt, und nur den vorderen als knorpelige Grundlage des Säugetierunterkiefers zurückläßt.

Zungenbein. Das Zungenbein der Säuger besteht aus dem Zungenbeinkörper und zwei Paar Hörnern, den vorderen Cornua hyalia und den hinteren Cornua branchialia prima. Meist ist der stets verknöcherte Körper eine schmale quer gelagerte Platte; bei manchen Affen findet sich an seiner Hinterfläche eine Höhlung zur Aufnahme von Luftsäcken, die

mit dem Kehlkopf zusammenhängen Besonders stark ausgebildet ist dieser Zustand beim Brüllaffen. Die vorderen Hörner bestehen aus je einer Reihe von Knochen-

aus Schmelz, Dentin und Zement. Die von der Epidermis stammende Zahnleiste, welche beim Embryo nach innen in den Kiefer einsinkt, liefert zunächst nahe ihrem unteren

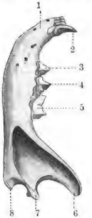


Fig. 16. Unterkiefer der Katze. 1 Gegend der Symphyse, 2 Eckzahn, 3 Erster Prämolar, 4 Zweiter Prämolar, 5 Molar, 6 Processus coronoideus, 7 Condylus, 8 Processus angularis.

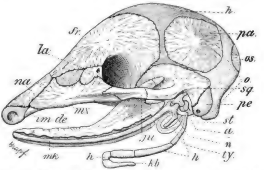


Fig. 17. Kopfskelett eines Embryo von Tatusia hybrida. Knorpeliges Primordialkranium punktiert, häutiges schraffiert. 1. Belegknochen: na Nasale, la Lacrymale, fr Frontale, pa Parietale, im Intermaxillare, mx Maxillare, ju Jugale, sq Squamosum, de Dentale, 2. Knorpel und primäre Knochen: os Occipitale superius, o Occipitalknorpel, pe Petrosum, a Amboß (Quadratum), n Hammer (Articulare), mk Meckelscher Knorpel, st Steigbügel (Hyomandibulare), h Zungenbeinknochen, kb Rest der Kiemenbögen, ty Tympanicum. Aus R. Hertwig.

stücken, von denen die drei untersten sowohl durch Bänder wie durch Knorpel verbunden sein können. Die hinteren Hörner sind meist kürzer als die vorderen und meist synchondrotisch mit dem Körper verbunden oder zu einem einheitlichen Knochenstück zusammengeflossen. Der Zungenbeinkörper stellt vielleicht eine Verschmelzung zweier Copulae, nämlich der des Zungenbeinbogens und der des darauffolgenden ersten Kiemenbogens dar, während die Vorderhörner ganz allgemein dem unteren Abschnitte des Zungenbeinbogens, die Hinterhörner dem ersten Kiemenbogen gleichgesetzt werden.

2d) Zähne. Die Zähne der Säugetiere sitzen in Alveolen und sind fast stets differenziert in meißelförmige Schneidezähne, kegelförmige Eckzähne und höckerige Backzähne. Das Säugetiergebiß ist also heterodont. Wie die Zähne der übrigen Wirbeltiere so bestehen auch die Säugetierzähne

Ende, aber lippenwärts davon, eine kleine Verdickung, welche erst knospenförmig, dann kappenförmig und endlich glockenförmig wird. Das ist das Schmelzorgan, dessen

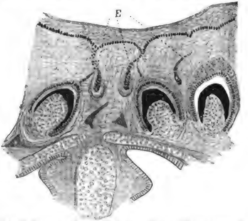


Fig. 18. Frontalschnitt durch den Kieferrand eines Beuteljungen von Didelphys. Erster und zweiter Schneidezahn mit Ersatzzahnanlagen (E.).

basale Schicht zum „inneren Schmelzepithel“ wird, hohen Zylinderzellen, aus denen der Schmelz hervorgeht. Das Innere des Schmelzorganes wird von einer transparenten Zwischensubstanz mit sternförmigen Epithelzellen ausgefüllt: der Schmelzpulpa. Später geht das Schmelzorgan zugrunde, und nur bei den immerwachsenden Zähnen, z. B. den Nagezähnen der Rodentier erhält es sich in seinem untersten Teile als epithelialer Ring um die Zahnbasis, die „Hertwigsche Epithelscheide“. Die Hauptmasse des Zahnes wird vom Zahnbein, Dentin, gebildet, das von den Odontoblasten abgeschieden wird. Die Odontoblasten sind mesodermale Zellen, die in einer Cutispapille liegen, die sich gegen das Schmelzorgan vorstülpt und zur Zahnpulpa wird. Die Odontoblasten senden feine protoplasmatische Ausläufer in radial ausstrahlende Kanäle des Zahnbeins hinein. Härter noch als das Dentin ist der Schmelz, der die feste Decke des freien Zahnes, der Zahnkrone, bildet und aus Prismen besteht, die durch etwas organische Substanz verkittet sind. Der verborgen bleibende Teil des Zahnes, die Wurzel, wird von knochenähnlichem Zement bedeckt. Zähne mit Krone und Wurzel haben ein beschränktes Wachstum, wurzellose dagegen sind immerwachsend oder doch sehr lange wachsend.

Das Säugetiergebiß unterscheidet sich von dem der anderen Wirbeltiere sehr wesentlich durch den nur einmaligen Zahnwechsel. Das zuerst erscheinende, auch phylogenetisch ältere Milchgebiß wird nach verschieden langer Zeit des Funktionierens durch eine zweite Serie, das Ersatzgebiß, abgelöst. Die Backenzähne des Milchgebisses heißen Milchprämolaren, sie werden in der zweiten Dentition durch entsprechende Prämolaren ersetzt und außerdem treten nach hinten von ihnen neue Zähne, die echten Molaren, auf, die im wesentlichen aus dem embryologischen Material der ersten Dentition entstehen, mit welchem das für die zweite Dentition verschmolzen ist. Außer diesen beiden Dentitionen treten bei den Säugetieren noch Spuren zweier weiterer auf, einer vor dem Milchgebiß gelegenen prälactealen, und einer postpermanenten. Von den mehrfachen Dentitionen der Vorfahren der Säugetiere kommen bei letzteren also nur 2 zur Ausbildung (Diphyodontie). Dieser Reduktionsprozeß geht innerhalb der Säugetierklasse noch weiter und es kann eine der beiden Dentitionen schwinden, so daß nur eine Zahngeneration in Erscheinung tritt (Monophyodontie). Es ist nun durchaus nicht immer das Milchgebiß, welches schwindet, sondern es kann auch das permanente Gebiß sein, wie bei den Beuteltieren, wo nur der letzte Prämolar einen Nachfolger hat. Auch bei den Zahnwalen persistiert die Milchdentition und die zweite ist rudimentär. Infolge spezieller Anpassung an die Art der Nahrungsaufnahme kann bei manchen Säugetieren das Gebiß völlig schwinden, doch ist das stets eine sekundäre, nie eine primitive Erscheinung. So haben wir es bei verschiedenen Ameisenfressern (Echidna, Myrmecophaga), sowie bei Planktonfressern (Bartenwale). Die Frage nach der Entstehung der komplizierten Zahnformen der Säugetiere aus den einfachen konischen (haplodonten) Zähnen ihrer mutmaßlichen Vorfahren wird meist dahin beantwortet, daß sich die anderen Spitzen am haplodonten Zahn sekundär herausdifferenzierten. Winge (1882) stellte zuerst die Theorie auf, daß der ursprünglich kegelförmige Zahn dreispitzig wird, indem er dort, wo er im gegenüberliegenden Kiefer derselben Seite einen vorderen und einen hinteren Zahn berührt, je eine Spitze ausbildet. An dieser dreispitzigen Krone kommt es dann zur Entwickelung zweier weiterer Spitzen, und weitere Differenzierung wurde erzielt durch verschiedene Ausbildung und Schärfe der Spitzen, ihre Verbindung durch Kämme, sowie durch Wegfall einer Spitze, an den Oberkieferzähnen auch durch Anlage eines „Talons“. Diese Theorie wurde 1884 von Cope in ähnlicher Form wiederholt, und Osborn baute sie noch weiter aus. Als Trituberkulartheorie hat sie fast allgemeine Anerkennung gefunden. Ihr gegenüber steht die Konkreszenztheorie, welche annimmt, daß die haplodonten Zahnkeime der Säugetiervorfahren gruppenweise zu mehrspitzigen Zähnen verschmelzen. Während aber Röse meint, daß die Spitze jeder einzelnen dieser verwachsenen Papillen in Form und Lage einem Höcker des ausgebildeten Milchzahnes entspricht, und entwickelungsgeschichtlich nachweisen zu können glaubte, daß sich das in der Anlage der Säugetiermolaren wiederhole, was durchaus irrtümlich ist, ist die Konkreszenztheorie, wie ich sie aufgestellt habe, zunächst basiert auf dem tatsächlichen Nachweis, daß solche Verschmelzungen embryonal noch heute eintreten können. Diese Nachweise haben sich derart gemehrt, daß es gar keine Frage mehr ist, daß bei der Entstehung der heutigen Säugetierzähne Verschmelzungsprozesse tätig gewesen sind, und gerade für die erste Entstehung der Backenzähne aus einhöckerigen Kegelzähnen liefert die Konkreszenztheorie eine viel einleuchtendere Erklärung als die Trituberkulartheorie. Aber auch für die Bildung der Schneidezähne ist, worauf Adloff besonders hingewiesen hat, eine Verschmelzung aus mehreren Einzelkomponenten anzunehmen. Andererseits habe ich aber die Konkreszenztheorie niemals so aufgefaßt, daß alle Höcker im Säugetier-

zahn auf ursprünglich getrennte haplodonte Zähne zurückzuführen sind, sondern stets darauf hingewiesen, welche große Rolle neben der Konkreszenz die Differenzierung spielt. Die Verwachsung von Einzelzähnen zu komplizierteren Formen hat jedenfalls bereits vor jenen Zeiten stattgefunden, als die ersten Säugetiere sich ausbildeten, und es mögen unabhängig voneinander multituberkulate, trikonodonte und trituberkulare Zahnformen entstanden sein. Bei der weiteren Ausbildung der Säugetierzähne hat aber die Differenzierung jedenfalls eine wichtige Rolle gespielt. So ist meines Erachtens die Trituberkulartheorie nicht imstande, das erste Zustandekommen der komplizierten Säugetierzähne zu erklären, wohl aber die Konkreszenztheorie. Erst von da ab kann man die Differenzierungstheorie gelten lassen. Auch für die Frage nach der Herkunft der Molaren ist die Konkreszenztheorie von Wichtigkeit. Durch die bei den Säugetieren eintretende Verkürzung der Kiefer, die besonders deren hintersten Teil betraf, wurde der Raum für die Zähne beschränkt, und der Durchbruch der hintersten Backenzähne verzögerte sich mehr und mehr, so daß schließlich die Anlagen der ersten und der zweiten Dentition immer näher zusammen rückten, und so durch Verschmelzung beider die Anlage des Molars entstand.

Bei den einzelnen Säugetierordnungen ist die Gestalt und Anzahl der Zähne sehr verschieden. Wenn Gleichartigkeit der Zähne auftritt (Homodontie), so ist das stets eine sekundäre Erscheinung (z. B. Gürteltiere, Waltiere). Um die Zusammensetzung des Gebisses kurz darzustellen bedient man sich der Zahnformeln, z. B. nimmt man als generalisiertes Gebiß der Monodelphier ein solches mit 44 Zähnen an und schreibt das so: $J\frac{3}{3}\,C\frac{1}{1}\,P\frac{4}{4}\,M\frac{3}{3}$. Die Homologisierung der einzelnen Zähne stößt vielfach auf Schwierigkeiten. In einzelnen Fällen kann auch sekundär eine Vermehrung der Zähne stattfinden durch Weiterwachsen der Zahnleiste am hinteren Kieferrande und Anlage neuer Zähne (Manatus, viele Zahnwale). Da die Bezahnung stets ein getreuer Ausdruck der Lebensweise des betreffenden Tieres ist, und auch von fossilen Säugetieren vielfach nur Zähne erhalten sind, ist das Zahnsystem für die Systematik von großer Bedeutung geworden. Am meisten differenziert erscheinen die Backenzähne. Sind die Höcker zugespitzt und schneidend, bei alternierender Stellung der Molaren, so heißen die Zähne sekodont (Insektivoren und Karnivoren), sind sie abgerundete isolierte Kegel, so sind sie bunodont (z. B. beim Schwein). Verbinden sich die Höcker durch Querleisten, so entsteht der lophodonte Zahntypus, und wenn sie „v“-förmige Gestalt annehmen und durch Abrundung zu halbmondförmigen Bildungen werden, so bildet sich der selenodonte Typus aus (Wiederkäuer). Durch weitere Differenzierung, insbesondere Faltung des Schmelzes der Joche oder Halbmonde entstehen die plicidenten Molaren.

2e) Muskulatur. Das Muskelsystem der Säugetiere ist besonders deshalb so stark differenziert, weil die einzelnen Körperteile eine viel größere Beweglichkeit haben als das bei den übrigen Vertebraten der Fall ist. Wenn wir zunächst die dem Integument angehörige Hautmuskulatur beiseite lassen und nur die Muskeln des Skeletts betrachten, so haben wir bei allen Wirbeltieren zwei große Gruppen zu unterscheiden, je nach der Genese, das sind die parietalen Muskeln und die visceralen Muskeln. Erstere stammen von den Myotomen, letztere von den Seitenplatten.

Parietale Muskulatur. Zu den parietalen Muskeln gehören vor allem Rumpf- und Gliedmaßenmuskeln, zu den visceralen die meisten Kopfmuskeln. Betrachten wir zunächst die Rumpfmuskeln der Säugetiere, so sehen wir auf der ventralen Seite im großen und ganzen eine Reduktion der Muskulatur eintreten. Kaudalwärts von der Rippenregion liegen drei meist einheitliche platte Muskeln, die Seitenbauchmuskeln, M. obliquus abdominis externus, internus und M. transversus abdominis, von denen die ersten beiden schräg verlaufen, der letztgenannte quer. In der ventralen Mittellinie wird von den von ihnen ausstrahlenden Aponeurosen der M. rectus abdominis eingescheidet, der bis ins Gebiet der ersten Rippe reichen kann. An seiner Ventralseite findet sich bei Beutlern der von den Beutelknochen entspringende M. pyramidalis. Den schrägen Seitenbauchmuskeln entsprechen in der Brustgegend die M. intercostales externi und interni. Gleichsam als Fortsetzung des M. rectus abdominis erscheint kranialwärts eine oberflächliche Lage von Muskeln, die zur Halsmuskulatur gehören. Auf der dorsalen Rumpfseite ist die ursprüngliche Metamerie länger erhalten als auf der ventralen. Die hier längs der dorsalen Fläche der Wirbelsäule ziehenden Muskeln zeigen einfache Verhältnisse, die in der Region der Halswirbel etwas komplizierter werden. Die Schwanzmuskulatur zeigt hohe Ausbildung bei jenen Formen, für die der Schwanz ein wichtiges Bewegungsorgan beim Klettern, Hüpfen oder Schwimmen ist. Hier lassen sich Flexoren, Extensoren und Abduktoren unterscheiden. Mit der Reduktion des Schwanzes fallen auch diese Muskeln der Rückbildung anheim. Auch die Muskeln der Gliedmaßen gehören der parietalen Muskulatur an und zwar werden sie als Abkömmlinge der ven-

tralen Rumpfmuskulatur bezeichnet. Es läßt sich in jeder Extremität eine dorsale von einer ventralen Muskelschicht sondern. Besonders stark differenziert sich die Muskulatur des Schultergürtels, mehr noch als die des Beckengürtels, da das Becken ja fest mit der Wirbelsäule verbunden ist. Die Muskulatur der Extremitäten zeigt eine große Variationsbreite, entsprechend den außerordentlich verschiedenen Funktionsanforderungen infolge verschiedener Lebensweise. Mit der Zunahme der physiologischen Leistung geht auch eine höhere Differenzierung der Muskulatur Hand in Hand.

Zwerchfell. Ferner stammen von der parietalen Muskulatur ab die später zu besprechenden Augenmuskeln und das Zwerchfell. Das Zwerchfell (Diaphragma) ist eine erst bei den Säugetieren zu voller Entwickelung kommende Scheidewand, welche an der Wirbelsäule, dem Brustbein und den Rippen entspringt und die Leibeshöhle in zwei Abschnitte zerlegt: die Herzbeutelbrusthöhle und die Abdominalhöhle. Durchbohrt wird es vom Oesophagus, der Aorta, der unteren Hohlvene, der Vene azygos und hemiazygos, dem Ductus thoracicus sowie von Nervenstämmen. Ursprünglich stellte das Zwerchfell eine bindegewebige Anlage dar, in welche die Muskulatur erst sekundär einwuchs. Meist besitzt es noch eine Sehnenpartie, das Centrum tendineum, und diese plattenartige Bildung kann bei Primaten mit dem Herzbeutel verwachsen, wie das beim Menschen der Fall ist. In erster Linie ist das Zwerchfell bei der Atmung mit tätig. In der Ruhelage ist es kuppelförmig gegen die Brusthöhle gewölbt.

Viscerale Muskulatur. Wir kommen nunmehr zur visceralen Muskulatur, welche den größten Teil der Kopfmuskeln liefert. Zu dieser gehört die Kaumuskulatur, die den Unterkiefer gegen den Oberkiefer zu bewegen hat. Der Musculus temporalis entspringt in der Schläfengegend des Schädels und inseriert am Kronenfortsatz des Unterkiefers. Die Ausbildung von Knochenkämmen auf Scheitel und Hinterhaupt alter Tiere hängt mit der Ausbildung des als einfacher Heber des Unterkiefers wirkenden Schläfenmuskels zusammen, der dabei von dem Musculus masseter unterstützt wird. Letzterer ist auch bei der Gleitbewegung des Unterkiefers, besonders von hinten nach vorn tätig, während eine seitliche Gleitbewegung von den Musculi pterygoidei besorgt wird. Um den Unterkiefer herabzuziehen, tritt der M. digastricus in Tätigkeit, der meist vom Processus paroccipitalis entspringt und sich am Unterrand des Unterkiefers ansetzt. Zur Hebung des Mundhöhlenbodens dient der M. mylohyoideus. Damit kommen wir zu einer Muskelgruppe, die von der Visceralmuskulatur abstammt, welche zur Hebung des Zungenbeins und Pharynx, sowie als Rückzieher der Zunge wirkt.

Hautmuskulatur. Schließlich ist noch eine besondere Muskulatur zu erwähnen, die größtenteils durch Abspaltung von parietaler und von visceraler Muskulatur entstanden ist und zur Hautmuskulatur wird. Die Hautmuskeln gewinnen bei den Säugetieren eine besondere Entwickelung, bei niederen Formen erstrecken sie sich noch über den ganzen Körper, bei höheren dagegen beschränken sie sich auf Hals und Kopf. Die hierzu gehörige Gesichtsmuskulatur gewinnt als mimische Muskulatur beim Menschen eine besonders hohe Ausbildung.

2f) Nervensystem. Wie bei allen anderen Wirbeltieren, so haben wir auch bei den Säugetieren ein zentrales und ein peripheres Nervensystem zu unterscheiden.

Zentrales Nervensystem. Das zentrale Nervensystem besteht aus dem Gehirn und dem Rückenmark, die beide aus dem dorsalen Ektoderm des Embryos hervorgehen, indem sich dieses in Form einer Rinne einsenkt, die sich dann dorsalwärts zu einem Rohre, dem Medullarrohre, schließt. Der kopfwärts gelegene Abschnitt wandelt sich zum Gehirn um, der hintere Abschnitt zum Rückenmark. Der von ihnen eingeschlossene Kanal wird im Gehirn zu den Ventrikeln, im Rückenmark zum Zentralkanal, die beide in Verbindung bleiben.

Gehirn. Das Gehirn der Säugetiere läßt sich auf Grund seiner Entwickelungsgeschichte in zwei Hauptabschnitte zerlegen, einen prächordalen, das Archencephalon oder Urhirn, und einen dorsal von der Chorda gelegenen, das Rhombencephalon oder primäre Nachhirn.

Das Urhirn trennt sich in 3 Abteilungen, das sekundäre Vorderhirn, von dem jederseits der Lobus olfactorius ausgeht, das Zwischenhirn, das mit dem Sehorgan in Beziehung steht, und das an das Zwischenhirn anschließende Mittelhirn, Mesencephalon, als dritten Abschnitt des Urhirns. Vom Archencephalon gehen die beiden vordersten Hirnnerven, Olfactorius und Opticus, aus. Das Rhombencephalon zerfällt in 2 Abschnitte, das Hinterhirn, Metencephalon, und das sekundäre Nachhirn, Myelencephalon oder Medulla oblongata. Vom Rhombencephalon entspringen die 10 übrigen Hirnnerven. In diesen 5 embryologisch als Hirnbläschen erscheinenden Abteilungen findet sich die Fortsetzung des mit Flüssigkeit erfüllten Zentralkanals des Rückenmarks, der sich in ihnen zu den Ventrikeln erweitert, und dessen Wandungen ursprünglich aus Epithelzellen, dem Ependym, bestehen. Diese Wandungen werden dann in verschiedenem

Grade verdickt durch nervöse Substanz, die wenn aus Nervenfasern bestehend als weiße Substanz, wenn aus Ganglienzellen zusammengesetzt, als graue Substanz bezeichnet wird.

Bei ihrer ersten Anlage liegen die einzelnen Hirnabschnitte hintereinander, dann aber überlagern sie sich und es treten 3 Knickungen der Hirnachse ein, die Nacken-, Brücken- und Scheitelbeuge. Besonders das Vorderhirn und das Hinterhirn gewinnen an Mächtigkeit. In den beiden Vorderhirnhemisphären finden sich der erste und der zweite Ventrikel oder die Ventriculi laterales, die durch das Foramen Monroi mit dem dritten Ventrikel im Innern des Zwischenhirns in Verbindung stehen. Im Mittelhirn ist der Ventrikelhohlraum reduziert zu einem engen Kanal, dem Aquaeductus Sylvii, der zu dem vierten Ventrikel, dem Ventriculus rhomboidalis führt. Das Dach dieses Ventrikels wird im vorderen Teil vom Kleinhirn, im hinteren aber nur durch eine zarte, aus Ependym bestehende Membran gebildet. Boden und Seitenwände dieses Ventrikels werden von den aus dem Rückenmark in die Medulla oblongata eintretenden Nervensträngen gebildet. Der ventrale Teil des Hinterhirns ist ein queres Kommissurensystem, die Brücke, Pons Varoli, zu dem die Pedunculi cerebelli ad pontem vom eigentlichen Kleinhirn hinabziehen. Die Brücke umschlingt ventral das Nachhirn. Das Kleinhirn sondert sich in einen mittleren Abschnitt, den Wurm und die beiden seitlichen Kleinhirnhemisphären. Das Mittelhirn wird auf der Dorsalseite in 4 Hügel zerlegt, während basalwärts die Großhirnschenkel, Pedunculi cerebri, liegen, die als Fortsetzungen der Pyramidenstränge des Rückenmarks zum Großhirn verlaufen. Im Zwischenhirn liegen seitlich vom dritten Ventrikel die beiden Thalami optici. Der Ventrikel setzt sich ventralwärts in einen hohlen Zapfen, den „Trichter" (Infundibulum), fort, an den sich die Hypophyse anlagert. Davor liegt die Sehnervenkreuzung. Die Sehnerven treten in die Thalami optici ein, die durch eine die Ventrikelhöhle durchquerende Commissura media miteinander verbunden sind. Dorsalwärts legt sich am Dach des Zwischenhirns die Epiphyse an, rückt aber später näher an die Vierhügel. Das Vorderhirn, ursprünglich ein unpaares Hirnbläschen, wird durch eine immer tiefer einschneidende mediane Falte in die beiden Großhirnhemisphären zerlegt. Basal liegt, den Boden jedes Seitenventrikels bildend, das Stammganglion (Corpus striatum), das als Nucleus caudatus zum Thalamus opticus weiter zieht. Vorn und ventral liegt der zentrale Riechapparat, ein Teil des Großhirns, in welchen die Riechnerven eintreten, und der sich in verschiedene Abschnitte differenzieren kann, von denen das Ammonshorn (Hippocampus) eine Einfaltung der medialen Gehirnwand in den Seitenventrikel hinein darstellt. Beide Großhirnhemisphären werden durch Kommissuren verbunden, von denen die bei niederen Säugetieren am stärksten ausgebildete Commissura anterior auch bei Reptilien vorhanden ist. Bei den höheren Säugetieren entwickelt sich aber immer mehr der „Balken" (Corpus callosum), der den Monotremen und Marsupialiern noch fehlt. Ventral vom Balken tritt das Gewölbe (Fornix) auf, eine Fortsetzung des dorsal gelegenen Psalterium, welches die Kommissur der beiden Ammonshörner darstellt. Balken, Psalterium, Fornix und Commissura anterior schließen jederseits ein etwa dreieckiges Feld ein, zwischen denen ein schmaler Spalt vorhanden ist, der als Ventriculus septi pellucidi bezeichnet wird. Die zunächst glattwandige Hirnrinde beginnt innerhalb der Säugetierklasse Furchen zu bilden, die entweder auf einige wenige Urfurchen beschränkt bleiben (Rhinal- und Hippocampusfurchen, auch die Balkenfurche, Fissura splenialis und die Sylvische Furche sind sehr alt), oder es wird die Hirnrinde durch zahlreiche Furchen in viele Windungen zerlegt. Säugetiere mit derartig gefurchten Großhirnhemisphären nennt man gyrencephal im Gegensatz zu den ersterwähnten lissencephalen. Die Lagebeziehungen der einzelnen Furchen

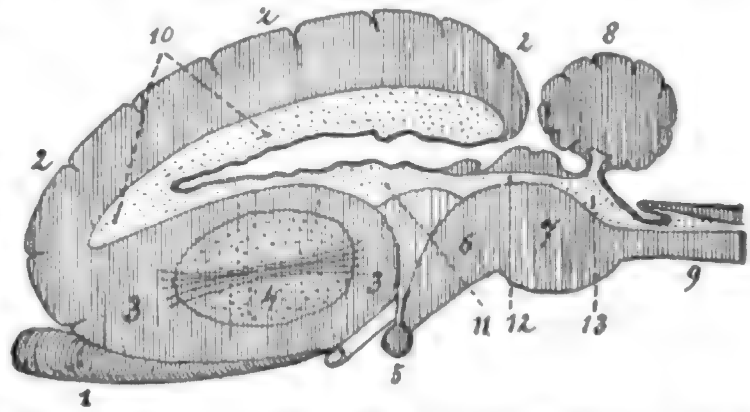
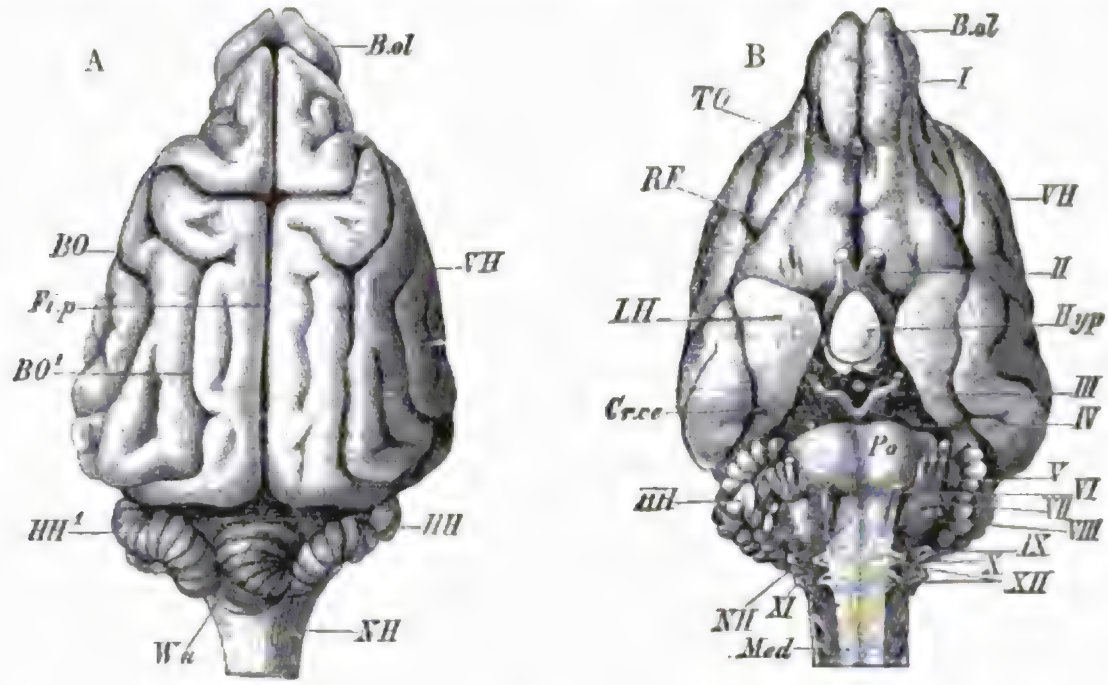


Fig. 19. Schematisierter Vertikalschnitt durch ein Säugergehirn. 1 Bulbus olfactorius, 2 Großhirnmantel, 3 Basilarer Stammteil, 4 Corpus striatum, 5 Hypophysis, 6 Pedunculi cerebri, 7 Pons Varoli, 8 Cerebellum, 9 Medulla oblongata, 10 Ventriculus lateralis, 11 Dritter Ventrikel, 12 Aquaeductus Sylvii, 13 Vierter Ventrikel. Nach Weber.

zeigen innerhalb einzelner Ordnungen eine weitgehende Konstanz und lassen eine Homologisierung zu. Der Grad der Furchung eines Gehirns hängt von verschiedenen Faktoren ab, so auch von der Gehirngröße.

Die Hirnmasse nimmt keineswegs proportional dem Körpergewicht zu. So wiegt das Gehirn eines großen Bartenwales nur etwa 6 bis 7 kg und verhält sich zum Körpergewicht etwa wie 1:20000. Der Elefant mit einem Hirngewicht von 5430 g zeigt eine Relation zum Körpergewicht von 1:560, der Mensch, dessen Gehirn ca. 1400 g wiegt, eine solche von 1:46, und der kleine südamerikanische Affe Ateles ater mit 126 g Hirngewicht weist ein Verhältnis zum Körpergewicht wie 1:15 auf. Der Mensch hat also weder das größte absolute noch das größte relative Hirngewicht unter den Säugetieren.

Rückenmark. Das Gehirn setzt sich durch die Medulla oblongata in das Rückenmark fort, das in seinem Bau sich im wesentlichen an das der anderen Vertebraten anschließt. Es erstreckt sich nicht mehr in der ganzen Länge des Wirbelkanals, sondern löst sich schon vorher in ein Büschel von Nerven, die Cauda equina, auf. Hals- und Lendenanschwellung sind deutlich ausgeprägt. Den Zentralkanal umgibt die graue, auf Querschnitten in jeder Hälfte in ein Vorder- und Hinterhorn ausgezogene Substanz. Peripher davon liegt die weiße Substanz in je einem ventralen, lateralen und dorsalen Strang angeordnet. In der ventralen und dorsalen Mittellinie verläuft je eine Längsfurche. Die Hüllen, welche das Zentralnervensystem umgeben, sind zu innerst die Pia mater, die bei Säugetieren meist ansehnlich dick ist, von Lymphe durchströmt wird und sich in 2 Schichten spaltet, von denen die äußere zur Arachnoidea wird, ein System maschiger Hohlräume. Die äußere Umhüllung des Zentralnervensystems ist die Dura mater, aus sehr kräftig entwickeltem Bindegewebe bestehend. Von dieser äußeren Hülle zieht eine sagittale Lamelle (Falx) in die Spalte zwischen die Großhirnhemisphären hinein und auch die zwischen Großhirn und Kleinhirn vorhandenen Spalträume werden von solchen Lamellen, dem Tentorium, eingenommen. Falx wie Tentorium können mehr oder minder ausgedehnt verknöchern.



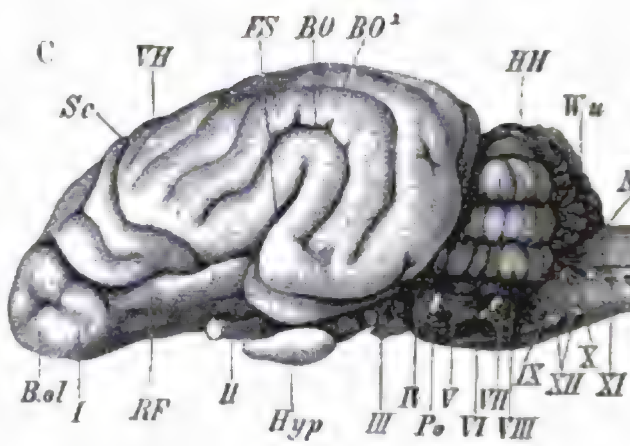


Fig. 20. Gehirn eines Hühnerhundes. A Dorsale, B Ventrale, C Profilansicht. BO, BO¹ Bogenfurchen, B.ol Bulbus olfactorius, Cr.ce Crura cerebri, Fi.p Mantelspalte, FS Fissura Sylvii, HH, HH¹ Kleinhirnhemisphären, Hyp Hypophyse, I—XII Hirnnerven, LH Lobus Hippocampi, Med Medulla spinalis, NH Nachhirn, Po Brücke, RF Fissura rhinalis, Sc Fissura cruciata, VH Vorderhirn, Wu „Wurm" des Hinterhirns. Aus Wiedersheim.

Peripheres Nervensystem. Vom Gehirn wie Rückenmark gehen paarig angeordnete Nerven aus, die entweder von den Sinnesorganen aufgenommene Reize dem Zentralnervensystem zuführen (sensible Nerven) oder Willensimpulse zu den Muskeln senden (motorische Nerven). Die **Rückenmarksnerven** besitzen je eine ventrale und eine dorsale Wurzel. Die ventrale Wurzel enthält motorische, die dorsale sensible

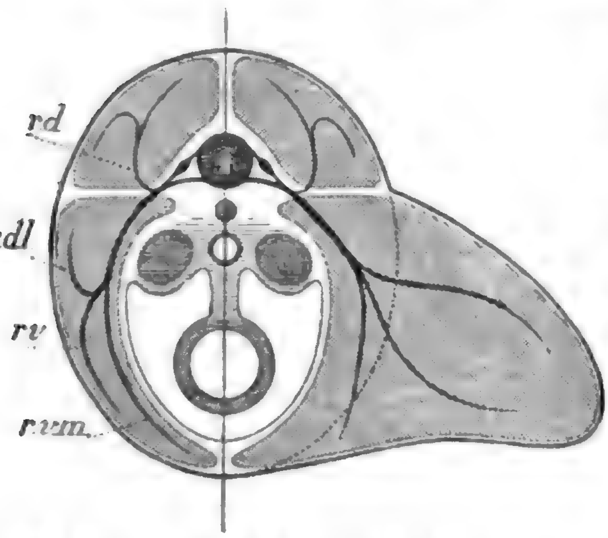


Fig. 21. Schema der Rückenmarksnerven. rd Ramus dorsalis, rdl Ramus dorsolateralis, rv Ramus ventrolateralis, rvm Ramus ventromedialis. Nach Eisler. Aus Weber.

Fasern. Letztere nehmen ihre Entstehung aus den Spinalganglien, und wachsen von diesen aus erst in das Rückenmark ein. Erst am distalen Ende jedes Spinalganglions vereinigen sich motorische und sensible Nervenfasern und dann teilt sich der Nervenstamm in 3 Zweige, einen dorsalen zu Muskulatur und Haut des Rückens ziehenden, einen ventralen, der an die seitlichen und ventralen Körperwände geht, und einen intestinalen, der mit dem sympathischen Nervensystem in Verbindung tritt. Im Gebiete der Gliedmaßen treten die Spinalnerven gruppenweise zu Geflechten zusammen, die man als Plexus cervicalis, brachialis, lumbalis und sacralis bezeichnet.

Gehirnnerven. Die Gehirnnerven bieten mit Ausnahme der beiden ersten dem Archencephalon zugehörigen mancherlei Vergleichspunkte mit den Rückenmarksnerven. Es sind 12 Gehirnnerven vorhanden. Der erste ist der Geruchsnerv N. olfactorius, der, mit Ausnahme von Ornithorhynchus, wo er einen einheitlichen Nerven bildet, in Form zahlreicher Fädchen durch die Siebbeinplatte tritt. Bei den Zahnwalen ist er mit dem Verlust des Geruchsorganes meist völlig geschwunden, bei den Bartenwalen rudimentär. Der zweite Nerv ist der Augennerv, N. opticus, der als ausgestülpter Teil des Urhirns aufgefaßt wird. Beide Augennerven nehmen ihren Ursprung als Tractus optici vom Dache des Mittelhirns und von den Thalami optici, und ihre Fasern kreuzen sich zum Teil in dem Chiasma. Die übrigen 10 Hirnnerven gehören dem Rhombencephalon an. Der dritte, vierte und sechste sind Augenmuskelnerven und heißen N. oculomotorius, trochlearis und abducens. Die anderen Hirnnerven dagegen sind vorwiegend sensibel und wie die sensiblen Wurzeln der spinalen Nerven ebenfalls mit je einem Ganglion versehen, doch enthalten sie auch motorische Nervenfasern, die zu der visceralen Muskulatur ziehen. Der erste Visceralbogen wird vom N. trigeminus versorgt, dessen Ganglion das Ganglion Gasseri heißt; von den drei Aesten, nach welchen dieser Nerv seinen Namen hat, besitzt der Ramus ophthalmicus nur sensible Fasern und tritt in die Orbita ein, sein medialer Zweig versorgt die Schleimhaut der Nase mit sensiblen Nerven, sowie die Augenhüllen, andere Zweige ziehen zur Tränendrüse, oberem Augenlid usw. Der zweite Ast, Ramus maxillaris, ist ebenfalls rein sensibel, innerviert die Schleimhaut des Gaumens, das Zahnfleisch und die Oberkieferzähne und tritt als Nervus infraorbitalis auf die Gesichtsfläche. Der dritte Ast, Ramus mandibularis, ist im wesentlichen motorisch und innerviert die Kaumuskeln u. a., mit seinem sensiblen Teil Zahnfleisch und Zähne des Unterkiefers.

Der siebente Hirnnerv, der N. facialis, hängt mit dem achten, dem N. acusticus, innig zusammen, und ist vorwiegend ein motorischer Nerv, der besonders die Hautmuskeln von Gesicht, Hals, Kopfhaut, Ohr und Augenlidern innerviert. Der achte Hirnnerv, der Hörnerv, N. acusticus, teilt sich bald nach seinem Ursprung in den die Schnecke innervierenden Ramus cochlearis und einen statischen Ramus vestibularis.

Die 3 folgenden Hirnnerven (9., 10. und 12.) werden zur Vagusgruppe gerechnet. Der Glossopharyngeus (IX) ist vorwiegend ein die Zunge innervierender Geschmacksnerv, der zehnte Hirnnerv, der N. vagus, hat ein sehr großes Verbreitungsgebiet, indem er auch auf den Rumpf übergeht. Ein Ast innerviert Teile des Pharynx, sowie die Muskulatur des Kehlkopfes, während ein intestinaler Ast den Vorderdarm sowie Luftröhre und Lunge, ferner Dünndarm, Leber, Milz, aber auch das Herz innerviert. Auch der zwölfte Hirnnerv, der N. accessorius Willisii, gehört zur Vagusgruppe, er ist ein rein motorischer Nerv, der Muskeln des Schultergürtels innerviert. Der elfte Nerv, N. hypoglossus, innerviert die Muskulatur der Zunge.

Wie allen Wirbeltieren, so kommt auch den

Säugetieren ein sympathisches Nervensystem zu. welches aus dem spinalen Nervensystem entstanden und mit ihm zeitlebens verbunden ist. Die Ganglien dieses hauptsächlich im Verlauf des Darmtraktus, des Gefäßsystems und der drüsigen Organe gelegenen sympathischen Nervensystems sind ursprünglich segmental angeordnet, doch ist diese segmentale Anordnung bei Säugetieren besonders im Halsteil verwischt, auch läßt sich hier vielfach eine Reduktion der Zahl der Halsganglien wahrnehmen, nur bei den Primaten kommt eine Vermehrung der Halsganglien vor.

2g) Sinnesorgane. Wie bei allen anderen Wirbeltieren so entstehen auch bei den Säugetieren die perzipierenden Elemente der Sinnesorgane aus dem Ektoderm, und nur die des Auges machen insofern eine Ausnahme, als sie sich aus dem Medullarrohr bilden, das aber seinerseits ebenfalls aus einer ektodermalen Einsenkung entstanden ist 2 Hauptgruppen von Sinnesorganen lassen sich unterscheiden, die Hautsinnesorgane, und die in der Kopfregion liegenden höheren Sinnesorgane. von denen sich die Organe des chemischen Sinnes, nämlich Geschmack und Geruch von denen des Gehörs und Gesichts abtrennen lassen.

Hautsinnesorgane. Wir beginnen mit den Hautsinnesorganen, die bei den Amnioten infolge der Verhornung der obersten Epidermisschichten weniger ausgebildet sind als bei den Anamniern. Da finden sich zunächst zwischen den Epidermiszellen Endigungen von sensiblen Nerven, die nicht mit besonderen Sinneszellen in Verbindung stehen, sondern in verschiedener Weise frei und interzellular endigen. Indem bestimmte Haare, besonders solche, welche zwischen den beiden bindegewebigen Haarbalgschichten Bluträume enthalten, von solchen im Corium liegenden Nervengeflechten umsponnen werden, werden diese Haare zu sogenannten Tasthaaren. An unbehaarten Körperstellen liegen Tastzellen, die von der Epidermis abstammen, und entweder isoliert sind oder zu Gruppen, den tastfleckenähnlichen „Haarscheiben" oder besonderen Tastkörperchen zusammentreten. Letztere sind besonders an den Extremitätenenden wie im Gebiete der Schnauze entwickelt. Bildungen besonderer Art sind die kolbenförmigen oder Vater-Pacinischen Körperchen, die von einer bindegewebigen Hülle umgeben sind und sich nicht nur überall im Corium der Haut, sondern auch in verschiedenen Organen der großen Körperhöhlen vorfinden.

Geschmacksorgane. Die Geschmacksorgane der Säugetiere weisen mancherlei Aehnlichkeiten mit den Sinnesknospen der Fische auf, sind aber auf die Mundhöhle und zwar besonders auf die Schleimhaut der Zunge des weichen Gaumens und des Rachens beschränkt. Sie finden sich als becherförmig angeordnete Zellgruppen auf der Zunge in den Papillae vallatae, fungiformes und in den Papillae foliatae der Zungenwurzel. Die Fasern des Nervus glossopharyngeus treten allem Anscheine nach nicht in die Geschmackszellen sondern zwischen sie hinein. Bei aquatilen Säugetieren können sich die Geschmacksorgane in verschieden hohem Maße zurückbilden (Sirenen, Wale).

Geruchsorgan. Das Geruchsorgan hat seinen Sitz in dem als Regio olfactoria bezeichneten Abschnitt der Nase, der das Siebbeinlabyrinth enthält. Die Zahl der Siebbeinmuscheln variiert sehr erheblich, und man unterscheidet bis zum Septum reichende Endoturbinalia von dazwischenliegenden kürzeren Ektoturbinalia. Erstere liegen medial, letztere lateral. Die erste Siebbeinmuschel, das Nasoturbinale, trägt keine Riechschleimhaut, dagegen ist der größte Teil der eigentlichen Ethmoturbinalia mit Riechschleimhaut ausgekleidet. Die Riechzellen sind

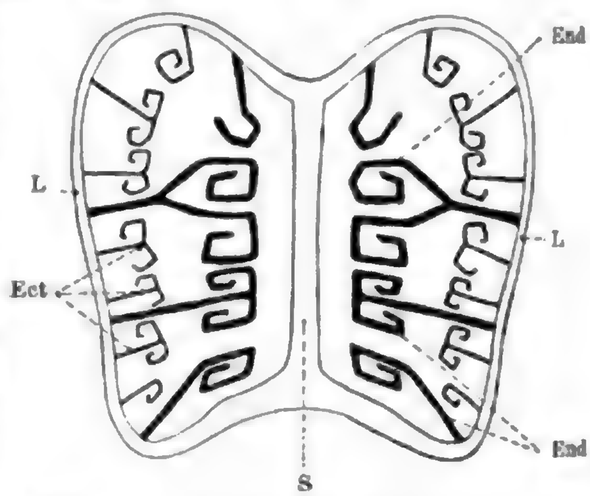


Fig. 22. Frontalschnitt durch das Cavum nasale eines Säugetieres. Schema. Ect Ectoturbinalia, End Endoturbinalia, L Lateral, S Septum. Aus Wiedersheim.

lange stabförmige durch Stützzellen getrennte Elemente, mit einem Besatz von feinen Borsten, während ihr basales Ende sich direkt in je einen Nervenfaden fortsetzt, so daß Riechzelle und Riechfaden eine organische Einheit bilden.

Die Ausbildung des Geruchsorgans erreicht bei den Säugetieren die höchste Stufe unter den Vertebraten, doch treten auch hier bereits Rückbildungen auf. So ist bei den Primaten das Geruchsorgan schwach ausgebildet und bei den aquatilen Säugetieren wird es in verschiedenem Maße rudimentär. Bei den Zahnwalen ist es völlig geschwunden, ebenso wie der Riechnerv bei den meisten gänzlich verloren gegangen ist.

Ein eigenartiges mit dem Geruchsorgan

in Beziehung stehendes Organ ist das Jacobsonsche Organ, das sich bei allen Tetrapoden findet. Bei den Säugetieren liegt das Jacobsonsche Organ an der Seitenfläche des Pflugscharbeines. Während das Hinterende dieses Organs meist blind geschlossen ist, mündet sein vorderes offenes Ende meist in den Stensonschen Gang, bei manchen Nagern und den Primaten dagegen in die Nasenhöhle. Die Wandung des Jacobsonschen Organs besteht medial aus hohem Sinnesepithel, lateral aus kubischem Epithel. Das hintere blinde Ende ist mit Flimmerepithel ausgekleidet und von Drüsengewebe umgeben, auch ist Schwellgewebe in dieser Region beschrieben worden. Die Sinneszellen des Organs stimmen mit den Riechzellen der Nasenschleimhaut überein. Beim Menschen ist das Jacobsonsche Organ funktionslos geworden und stellt sich als ein plattgedrücktes von Schleimdrüsen umgebenes Rohr von verschiedener Weite dar. Bei guter Ausbildung ist das Jacobsonsche Organ umhüllt von einem rinnen- oder röhrenförmigen Knorpel, dem Jacobsonschen Knorpel, der aus einem vorderen Abschnitt der Cartilago paraseptalis entstanden ist.

Ueber die Funktion des Jacobsonschen Organes wissen wir noch nichts Sicheres, da es vor allem an Experimenten fehlt. Jedenfalls besitzt es bei jenen Säugetieren, bei welchen es in den Stensonschen Gang mündet, Beziehungen zur Mundhöhle. Welcher Art aber diese Beziehungen sind, darüber sind bis jetzt nur unbewiesene Vermutungen aufgestellt worden. Jedenfalls ist es ein Hilfsorgan des Geruchsorganes, wie die Innervierung seines Sinnesepithels vom Riechnerven aus beweist.

Mit der Nasenhöhle in Verbindung stehen pneumatische Nebenhöhlen, die sich, ebenfalls mit Schleimhaut bekleidet, in die benachbarten Knochen hinein erstrecken. Diese Höhlen können auch von der Regio olfactoria ausgehen und zur Aufnahme von Ethmoturbinalia dienen.

Die äußere Nase wird durch Knorpel, die Cartilagines alares, gestützt, welche sich an die knöcherne Umwandung der äußeren Nasenöffnung anschließen. Seitliche Fortsätze des knorpeligen Nasenseptums können diese aus dem Knorpel der Nasenkapsel entstandenen Cartilagines alares verstärken. Die Bewegung der Nasenflügel wird durch aus der Gesichtsmuskulatur hervorgegangene Muskeln bewirkt.

Auge. Das Auge der Säugetiere ist wie das der übrigen Wirbeltiere in seiner ersten Entstehung dem primären Vorderhirn zuzurechnen, das die beiden primären Augenblasen ausbildet. Aus diesen entsteht der doppelwandige Augenbecher mit einem inneren Blatt, der Netzhaut oder Retina, und einem äußeren, dem Tapetum nigrum. Die Retina ist aus nervöser Substanz und aus Stützsubstanz zusammengesetzt, von denen erstere in folgenden Schichten angeordnet ist. Zu innerst liegen die Endfasern des Augennerven, der in das Auge mit einer Papille eintritt. Dann folgt eine Ganglienzellenschicht, die innere retikuläre Schicht, die Körnerschicht und die äußere retikuläre Schicht. Alle diese Schichten zusammen gehören der Gehirnschicht des inneren Blattes der sekundären Augenblase an, nach außen davon liegt als Epithelschicht die Schicht der Sehzellen und das Pigmentepithel der Retina.

Als dioptrischer Apparat entsteht aus einer ektodermalen Verdickung und Abschnürung die Linse, und im Innern des Augenbechers der ursprünglich von den

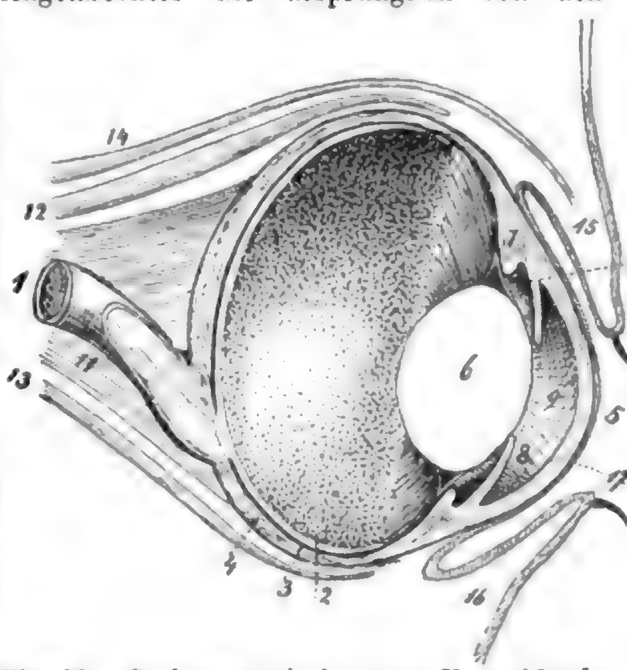


Fig. 23. Schematisierter Vertikalschnitt durch ein Säugetierauge. 1 Nervus opticus, 2 Retina, 3 Chorioidea, 4 Sclera, 5 Cornea, 6 Linse, 7 Corpus ciliare, 8 Iris, 9 vordere Augenkammer, 10 hintere Augenkammer, 11 Musculus retractor bulbi, 12 Musculus rectus superior, 13 Musculus rectus inferior, 14 Musculus levator palpebrae superioris, 15 oberes Augenlid, 16 unteres Augenlid, 17 Conjunctiva corneae. Nach Weber.

Retinazellen und den Zellen der hinteren Linsenfläche, dann aber auch von einwanderndem Mesoderm gelieferte Glaskörper. Die Linse ist verschiedengradig abgeflacht, bei den aquatilen Säugetieren dagegen kugelförmig. Aus der vorderen Wand der ursprünglich bläschenförmig angelegten Linse bildet sich das Linsenepithel, während seine nach innen gerichtete Wand sich durch Auswachsen der Zellen zu langen Fasern verdickt und schließlich den Hohlraum der Linse zum Verschwinden bringt.

Zu diesen beiden Bestandteilen des Auges,

dem cerebralen und dem dioptrischen, gesellt sich als dritter die Umhüllung mit zwei aus dem Mesoderm stammenden Schichten, der inneren Aderhaut (Chorioidea) und der äußeren bindegewebigen Sklera.

Die Aderhaut, welche der Pia mater und Arachnoidea der Gehirnhüllen entspricht, enthält zahlreiche Gefäße. Zu innerst liegt die Choriocapillaris mit Kapillargefäßen, dann folgt bei manchen Säugetieren ein mehrschichtiges Epithel, welches entweder stark glänzende kristallähnliche Einschlüsse enthält (Tapetum lucidum cellulosum der Carnivoren) oder nur zu langen Fasern auswächst (Tapetum lucidum fibrosum der Ungulaten). Darauf folgt die sogenannte Grundsubstanz der Chorioidea mit großen Arterien und Venen, und nach außen liegt die Suprachorioidea. Nach vorn geht die Chorioidea in die Iris über, die von dem runden, ovalen oder spaltförmigen Sehloch, der Pupille, durchbohrt wird. Die Pupille kann durch ringförmige wie radiär verlaufende glatte Muskelfasern verengert und erweitert werden. An dem peripheren Rand der Iris inseriert der ebenfalls aus glatten Muskelfasern bestehende Ciliarmuskel, der eine Wölbungsänderung der Linse und damit eine Akkommodation des Auges bewirkt. Diese Ciliarmuskulatur liegt in dem Ciliarkörper, der an seiner Innenfläche mit strahlig angeordneten Fortsätzen versehen ist. An den Ciliarkörper schließt sich ein ringförmiges Aufhängeband der Linse, die Zonula Zinni, an, die an die Linsenkapsel herantritt.

Die äußerste Schicht des Auges ist die der Dura mater entsprechende Sklera. Bei manchen Monotremen enthält sie Knorpel, dagegen treten Verknöcherungen, wie wir sie im Auge anderer Wirbeltiere kennen, im Säugetierauge nicht auf. Der Grund mag darin liegen, daß das Säugetierauge in großer Ausdehnung von der knöchernen Orbita bereits geschützt ist. Bei manchen Formen kann die Sklera eine außerordentliche Dicke und Festigkeit erreichen, indem die bindegewebigen Fasern dicht miteinander verfilzt sind; das ist bei dem Auge der Wale der Fall, wohl um dem großen Wasserdrucke beim Tauchen zu begegnen. Vorn wird die Sklera zur durchsichtigen Hornhaut (Cornea), die an ihrer Außenfläche von der hier ebenfalls durchsichtigen Bindehaut (Conjunctiva) überzogen ist. Die Conjunctiva ist ein Teil des Integumentes.

Von den Hilfsorganen des Auges sind zunächst die Augenmuskeln zu erwähnen, 4 gerade und 2 schiefe, von denen die ersteren das Auge um eine vertikale und eine horizontale Achse bewegen, die letzteren die Rollbewegungen ausführen. Der obere schiefe Augenmuskel geht durch einen als Rolle funktionierenden Ring faserigen Bindegewebes, die Trochlea. Innerhalb der geraden Augenmuskeln liegt bei Säugern der Musculus retractor bulbi, der besonders bei Ungulaten stark ausgebildet ist, den Primaten dagegen fehlt. Andere Hilfsorgane sind die Augenlider, Hautduplikaturen, welchen ringförmige Muskulatur, der Musculus orbicularis, eingelagert ist. Auch kann es zur Ausbildung von Faserknorpel kommen. Bei Säugetieren erscheint die Nickhaut, die einen Knorpel enthalten kann, als Falte der Conjunctiva im inneren Augenwinkel. Bei den Primaten ist sie zur Plica semilunaris reduziert. Von Drüsen ist die Hardersche Drüse am inneren Augenwinkel, die Tränendrüse am äußeren Augenwinkel und die Gruppe der Meibomschen Drüsen hinter den Wimpern des oberen Augenlides zu erwähnen. Nur letztere sind acinös und ihr Sekret ist fettig. Rudimentäre Augen finden sich bei unterirdisch lebenden Beutlern (Notoryctes), Nagern und Insektenfressern. Auch ein indischer Flußdelphin, Platanista gangetica, hat rudimentäre Augen.

Gehörorgan. Das Gehörorgan der Säugetiere zeichnet sich vor dem der anderen Wirbeltiere dadurch aus, daß die Schnecke sich stark verlängert und spiralig aufrollt, sowie daß das Cortische Organ auf einer höheren

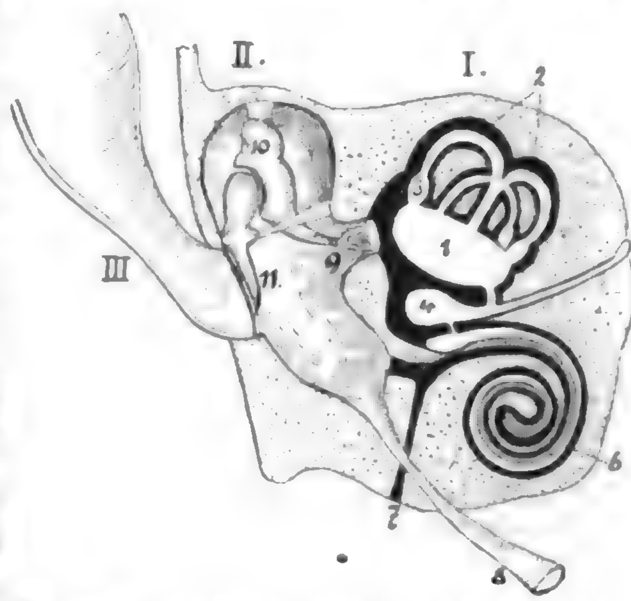


Fig. 24. Schema des Gehörorgans eines Säugetieres. I Innere Ohrsphäre: die mit Perilymphe gefüllten Räume sind schwarz, die mit Endolymphe gefüllten weiß; 1 Utriculus, 2 Bogengänge, 3 Ampulle, 4 Sacculus, 5 Aquaeductus vestibuli, 6 Canalis cochlearis, 7 Aquaeductus cochleae, II Mittlere Ohrsphäre: 8 Tuba Eustachii, 9 Steigbügel, 10 Amboß, 11 Hammer, III äußere Ohrsphäre. Nach Weber.

Stufe der Ausbildung steht. Vom häutigen Labyrinth weist der Utriculus mit seinen 3 Bogengängen keine besondere Differenzierung gegenüber den übrigen Wirbeltieren auf. Eine direkte Kommunikation von

Utriculus und Sacculus findet sich nicht mehr, dagegen eine indirekte durch den in 2 Aeste gespaltenen Ductus endolymphaticus, der in der Schädelhöhle unter der Dura mater mit einer blinden Erweiterung endigt. Der Sacculus steht durch einen engen Kanal, Canalis reuniens, mit der Schnecke in Verbindung. In letzterer befindet sich das Cortische Organ, in welchem sich zwei Zellenarten, die Pfeilerzellen und die Hörzellen befinden. Beide sitzen einer aus elastischen Fasern bestehenden Membran, der Membrana basilaris, auf. Zwischen den Sinneszellen endet der als Nervus cochlearis bezeichnete Ast des Hörnerven. Das gesamte häutige Labyrinth wird von dem knöchernen Labyrinth umgeben, jedoch so, daß sich zwischen beiden ein Hohlraum findet, das Cavum perilymphaticum, das mit Perilymphe erfüllt ist. Die Schallwellen werden vom Trommelfell durch die Kette der Gehörknöchelchen auf die Perilymphe, und von dieser auf die das Innere des häutigen Labyrinths erfüllende Endolymphe übertragen. Schließlich erhalten die Hörzellen des Cortischen Organs die Schallreize.

Das Mittelohr besteht aus der Paukenhöhle, die nach außen durch das bei Säugetieren tiefer ins Innere des äußeren Gehörganges zurückgezogene Trommelfell abgeschlossen ist, den in der Paukenhöhle liegenden 3 Gehörknöchelchen und der zum Rachen führenden Tuba Eustachii. Die 3 Gehörknöchelchen sind zu einer gelenkigen Kette verbunden, welche vom Trommelfell zu einer Oeffnung in der Labyrinthwand, der Fenestra ovalis, zieht. Dem Trommelfell liegt der dem Articulare entsprechende Hammer (Malleus) an, dessen rundlicher Kopf mit dem aus dem Quadratum entstandenen Amboß (Incus) artikuliert. Der darauf folgende Steigbügel besteht aus einer Platte, die in die Fenestra ovalis eingelassen ist, und 2 von der Arteria stapedia durchbohrten Schenkeln, die aber auch zu einer einheitlichen Masse verschmelzen können. Die Tuba Eustachii ist ein von der Paukenhöhle zur Seitenwand des Nasenrachenraumes ziehendes Rohr, das bei den Monodelphiern durch einen Tubenknorpel gestützt ist.

Der äußere Gehörgang ist ein knorpeliger Gang von verschiedener Länge, der zum größten Teil aus dem Hyoidbogen hervorgegangen ist. Er kann sich an einen knöchernen Teil des Gehörganges anschließen, der als Fortsetzung des Tympanicum erscheint.

Erst bei Säugetieren tritt ein wohlausgebildetes äußeres Ohr, die Ohrmuschel, auf. Ihre verschiedenen Partien entstehen embryologisch aus Höckern, welche die Oeffnung der ersten Kiemenspalte (Spritzloch) umgeben. Die Bewegung des Ohres, sowohl der gesamten Muschel wie einzelner Teile, wird durch ein kompliziertes System von Muskeln besorgt, die besonders bei Primaten wieder reduziert werden können.

Ganz eigenartige Umformungen hat das Gehörorgan rein aquatiler Säugetiere, insbesondere der Wale aufzuweisen. Sie lassen sich in folgenden Sätzen zusammenfassen. Der äußere Gehörgang hat sein freies Lumen verloren. Das Perioticum zieht sich, wie sich embryologisch verfolgen läßt, aus der Schädelkapsel zurück und steht unter der Schädelbasis. Das Trommelfell ist dick und undurchsichtig. Der Hammer ist unbeweglich und nicht federnd. Der Fortsatz des Ambosses, welcher die Verbindung mit dem Tympanicum vermittelt, ist auffallend dünn, der lange Fortsatz, der die Verbindung mit dem Steigbügel darstellt, sehr dick. Der Steigbügel ist plump und massig und ist in der Fenestra ovalis unbeweglich. Die Gelenke der Gehörknöchelchenkette sind durch Synchondrose funktionsunfähig. Die Fenestra rotunda ist verstopft. Aus diesen von Boenninghaus zusammengestellten Tatsachen zieht er den Schluß, daß dem Labyrinth der Wale die Schallwellen nicht durch Vermittlung des Trommelfelles oder des runden Fensters zugeleitet werden, sondern von der Bulla aus, durch den Processus folianus des Hammers und die Kette der Gehörknöchelchen. Jede diese Leitung durch Interferenz der Schallwellen störende Nebenleitung ist nach Möglichkeit, besonders durch die Isolierung, abgeschwächt.

Schließlich ist noch zu bemerken, daß pneumatische Höhlen mit der Paukenhöhle in Verbindung stehen können und von deren sich darin fortsetzender Schleimhaut ausgekleidet werden.

2h) Darmkanal. Wie bei den anderen Wirbeltieren, so wird auch bei den Säugetieren der Darmkanal durch ein verschieden langes Rohr dargestellt, dessen Wandung zu innerst aus einer Schleimhaut (Mucosa) nach außen aus einer Muskelschicht (Muscularis) besteht, über welche sich eine äußere, von der Leibeshöhlenwandung gebildete seröse Hülle (Serosa) erstreckt. Die Schleimhaut wird aus dem Epithel des Entoderms und aus darunterliegendem Bindegewebe zusammengesetzt. Die Muskelschicht, die nur am Anfang und Ende des Darmrohres quergestreifte, sonst glatte Muskulatur enthält, zerfällt meist in eine innere transversale und eine äußere longitudinale Schicht. Es lassen sich 3 Längsabschnitte unterscheiden: Vorder-, Mittel- und Hinterdarm. Der Vorderdarm reicht bis zur Einmündung des Gallenausführganges der Leber und läßt sich in vier Abschnitte zerlegen: Mundhöhle, Schlundkopf (Pharynx), Schlund (Oesophagus) und Magen (Ventriculus).

Mundhöhle. Wir beginnen mit der Mundhöhle, die vorn von den Lippen begrenzt ist. Die Lippen sind Hautduplikaturen, die fast stets beweglich sind. Bei manchen Formen kann die Oberlippe zur rüsselartigen Ver-

längerung der äußeren Nase beitragen. Seitlich liegen die Wangen, deren Ausdehnung von der der Lippen bedingt wird Zwischen Lippen und Wangen einerseits, den Kiefern und Zähnen andererseits liegt ein Vorraum der Mundhöhle, das Vestibulum oris, das bei manchen Formen (Nagern, Affen) jederseits eine Aussackung, die inneren Backentaschen, bilden kann, die als Futterbehälter dienen. In das Vestibulum oris münden Lippendrüsen. Von Backendrüsen sind vier verschiedene Komplexe zu unterscheiden: die Ohrspeicheldrüse (Glandula parotis), die Glandula submaxillaris mit benachbarter Gl. retrolingualis, und zwischen Zungenboden und Unterkiefer die Glandula sublingualis. Diese Drüsen dienen nicht nur zum Einspeicheln der aufgenommenen Nahrung, sondern bilden auch chemisch wirkende Enzyme.

Auf das Vestibulum oris folgt die eigentliche Mundhöhle, das Cavum oris, dessen Dach vom harten Gaumen gebildet wird. Bei vielen Säugetieren treten am harten Gaumen in zwei symmetrische Reihen angeordnete, quer gelagerte Gaumenleisten auf, Epithelerhebungen, die verhornt sein können und beim Zerreiben der Nahrung wirksam sind. Die Barten der Bartenwale haben sich auf Grundlage derartiger Gaumenleisten entwickelt.

Besondere Wichtigkeit erreicht bei Säugetieren die Zunge, die ein fast stets bewegliches und reich mit Drüsen versehenes Organ darstellt. Mitunter ist die Zungenoberfläche verhornt. Außer den bei der Besprechung des Geschmacksorganes schon erwähnten Zungenpapillen, welche die Geschmacksnerven beherbergen, gibt es auch rein mechanisch wirkende Papillen, die Papillae filiformes, die verhornen können (Katze). Die Zungenmuskulatur ist im allgemeinen sehr differenziert. Meist ist die Zunge weit vorstreckbar. Bei vielen Säugetieren liegt an der Unterfläche der Zunge eine verschiedengradig ausgebildete Portion, die als Unterzunge bezeichnet wird, und die man als Homologon der Sauropsidenzunge auffaßt, so daß alsdann die darüberliegende Muskelzunge der Säugetiere eine Neuerwerbung wäre. Die Zungendrüsen sind von acinösem Bau und scheiden ein schleimiges oder seröses Sekret aus.

In der Verlängerung des harten Gaumens liegt der weiche Gaumen, eine Schleimhautfalte (Velum palatinum), die beweglich ist

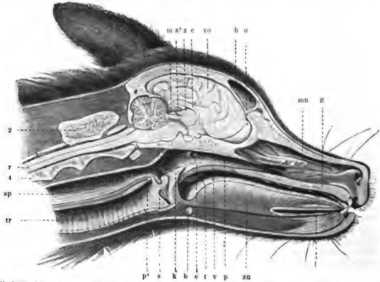


Fig. 25. Längsschnitt durch den Kopf und Hals eines Hundes. b Zungenbein, c Hirnbalken, e Oeffnung der Ohrtrompete in den Schlundkopf, g harter Gaumen, h Lufthöhle, k Epiglottis, l Lyssa, m Mittelhirn, mu Nasenmuscheln, o Riechkolben, p vorderes, p¹ hinteres Ende des Schlundkopfes, r Rückenmark, s Stimmband, sp Speiseröhre, t Mandel, tr Luftröhre, o Gaumensegel, vo Vorderhirn, z Zwischenhirn, z¹ Zirbel, zu Zunge, 2 Epistropheus, 4 vierter Halswirbel. Aus Boas.

und beim Menschen das Zäpfchen, Uvula, trägt. In dieser hinteren Mundhöhlenregion liegen lymphoide Organe (Tonsillae).

Schlundkopf (Pharynx). Auf die Mundhöhle folgt der Rachen oder Schlundkopf (Pharynx), in den die Luftwege einmünden. Der weiche Gaumen scheidet den Pharynx in einen oberen Nasenrachenraum und einen unteren Mundrachenraum. Der erstere kann sich als Tasche, Bursa naso-pharyngea, ausbilden. Den Pharynx umgibt reichliche Muskulatur, meist aus einer äußeren transversalen und einer inneren longitudinalen Schicht bestehend.

Speiseröhre (Oesophagus). An den Pharynx schließt sich die Speiseröhre (Oesophagus) an, die, das Zwerchfell durchbohrend, zum Magen führt. Die ursprünglich aus glatten Muskelfasern bestehende Muscularis der Speiseröhre wird teilweise durch vom Pharynx her einwandernde quergestreifte Muskulatur ersetzt, die bei manchen Formen (Nagern, Raubtieren, Wiederkäuern) bis zum Magen gelangen kann. In der Schleimhaut des Oesophagus, die aus geschichtetem Plattenepithel besteht, treten meist Drüsen auf.

Magen. Scharf vom Oesophagus abgesetzt erscheint bei Säugetieren der Magen, der eine außerordentlich verschiedene äußere Gestalt annehmen kann. In seiner einfachsten Form

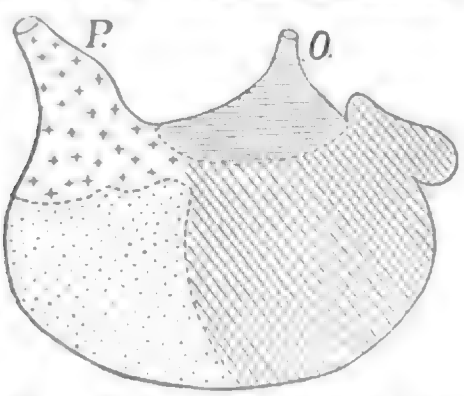


Fig. 26. Magen des Schweines. Querschraffiert: Schlundabteilung; schrägschraffiert: Cardiadrüsenzone; punktiert: Fundusdrüsen; Kreuze: Pylorusdrüsen; O Oesophagus, P Pylorus. Aus Weber.

erscheint er als ein quergelagerter Sack, der sich in zwei Abschnitte zerlegen läßt, eine mit dem Oesophagus zusammenhängende Pars cardiaca, mit der nach links schauenden Aussackung, dem Boden, Fundus, und der mit dem darauffolgenden Darmabschnitt, dem Duodenum, verbundenen Pars pylorica. Eine vielfach deutlich auftretende ösophageale Region des Magens ist mit mehrschichtigem Pflasterepithel ausgekleidet, das sogar verhornen kann. Es fehlen ihr aber alle Drüsen. Die anderen mit einschichtigem zylindrischem Magenepithel ausgekleideten Partien des Magens enthalten 3 verschiedene in Zonen angeordnete Drüsenarten, die Cardiadrüsenzone, die Fundusdrüsenzone und die Pylorusdrüsenzone, die entweder die ganze Magenwand einnehmen, oder auf bestimmte Abschnitte beschränkt sind. In den mit Pflasterepithel ausgekleideten Räumen wird das Futter aufgestapelt. Der Magen der Monotremen ist überhaupt nur von einem derartigen geschichteten Pflasterepithel ausgekleidet und völlig drüsenlos. Jedenfalls ist dies aber ein sekundärer Zustand. Vielfach ist der Magen auch äußerlich in einzelne Abschnitte geteilt, die mit der Verteilung der Drüsen in ihnen übereinstimmen können (Wale).

Ganz eigenartig sind die Magenverhältnisse bei den Wiederkäuern, bei denen vier Abteilungen vorhanden sind. Die ersten beiden, Pansen (Rumen) und Netzmagen (Reticulum), gehören zusammen und dienen nur als Behälter für die aufgenommene Nahrung. Auch die dritte Magenabteilung, der Blättermagen (Omasus), der durch ein System von inneren Längsfalten gekennzeichnet ist, enthält keinerlei Drüsen, und das Epithel dieser drei Abteilungen ist mehr schichtig und verhornt, hat also ösophagealen Charakter. Die aufgenommene Nahrung gelangt zunächst in den Pansen und von da in den Netzmagen. Alsdann wird die Nahrung wieder durch eine Art Erbrechen in die Mundhöhle zurückbefördert, nochmals gekaut und wieder verschluckt. Nunmehr gelangt sie aber in die sogenannte „Schlundrinne", welche an der oberen Magenwand von der Mündung des Oesophagus aus entlang zieht und bis zum Blättermagen, und wo dieser fehlt, direkt zur vierten Magenabteilung dem Labmagen (Abomasus) zieht. Letzterer allein enthält Drüsen, und die Nahrung kann nunmehr in ihm verdaut werden.

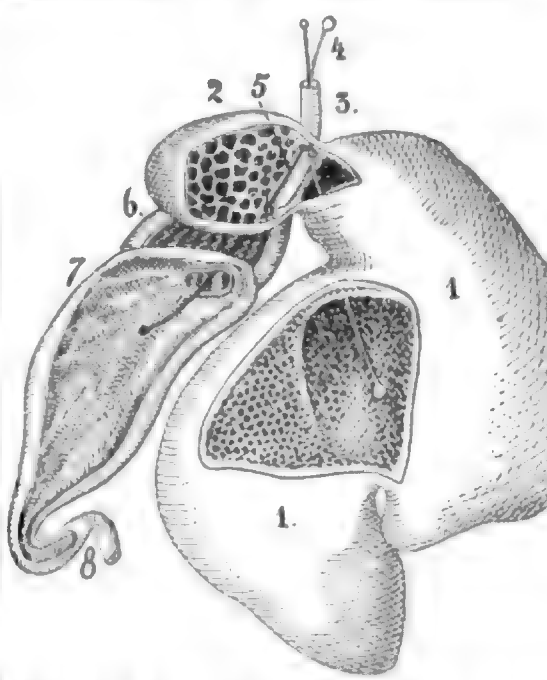


Fig. 27. Magen vom Schaf. 1 Pansen, 2 Netzmagen, 3 Oesophagus, 4 eingeführte Sonde, 5 Schlundrinne, 6 Blättermagen, 7 Labmagen, 8 Anfang des Dünndarms. Nach Carus und Otto. Aus Weber.

Der Magen der Wale besteht zwar auch aus mehreren Abteilungen, die aber hintereinander liegen, er hat also mit dem Wiederkäuermagen nichts zu tun, dessen Abschnitte nebeneinander liegen.

Darm. Der auf den Magen folgende Darm ist mit einschichtigem meist zylindrischem Epithel ausgestattet, von dem ein Teil der Zellen zu den sogenannten „Becherzellen“ werden kann, einzelligen Drüsen, die ein schleimiges Sekret absondern können. Die Länge des Darmes hängt im wesentlichen von der Art der Nahrung ab und ist bei Pflanzenfressern größer als bei Fleischfressern. Der auf den Magen folgende Darmabschnitt ist der Mitteldarm, der in den Zwölffingerdarm (Duodenum) und den in zahlreiche Windungen gelegten Dünndarm (Ileum) eingeteilt wird. Das Duodenum ist vom Magen durch den Pförtner (Pylorus), eine verengte Stelle meist mit dickem Muskelring, geschieden. Meist bildet es eine Schlinge. Seine Wandung enthält zahlreiche Drüsen verästelt-tubulöser Natur, die Brunnerschen Drüsen. Gelegentlich (Wale) kommen Längsfalten im Dünndarm vor, häufiger sind ringförmige Falten, die Valvulae conniventes Kerkringi. Als echte Drüsen sind die Lieberkühnschen Drüsen aufzufassen, die an der Bildung des Darmsaftes teilnehmen und in großer Zahl auftreten. Zum größten Teil auf den Mitteldarm beschränkt sind die Lymphfollikel oder „Peyersche Drüsen“.

Am Hinterdarm läßt sich ein Dickdarm (Colon) und ein gerader Darm (Rectum) unterscheiden. Der Dickdarm ist ähnlich dem Dünndarm gebaut, nur hat er ein weiteres Lumen. Ringförmige Einschnürungen rufen Ausbuchtungen (Haustra) der Darmwand hervor. Der Dickdarm kann erhebliche Länge erhalten und ordnet sich dann in Schlingen in der Bauchhöhle an. Am Uebergang vom Dünndarm in den Dickdarm liegt der Blinddarm (Coecum), der manchen Formen (z. B. Walen) fehlen kann, bei anderen verschieden groß entwickelt ist. Sein distaler Abschnitt ist bei manchen Formen rudimentär und stellt den Wurmfortsatz (Processus vermicularis) dar. Bei einzelnen Säugetieren ist der Blinddarm paarig, bei anderen findet sich noch ein zweiter Blinddarm. Das Rectum oder der Mastdarm ist mit einer starken Muscularis versehen und an seinem Ende treten auch Ringmuskeln auf. Bei den Monotremen mündet das Urogenitalsystem in den letzten Abschnitt des Rectums aus, der damit zur Kloake wird, auch bei weiblichen Beuteltieren kann man noch von einer Kloake sprechen. Mit dem Auftreten des Dammes (Perinaeum) scheiden sich die beiden Mündungen.

Der Darm wird durch das Mesenterium in der Sagittalebene an den Wänden der Bauchhöhle befestigt. Das dorsale Mesenterium erscheint als ein doppeltes Blatt, in welchem sowohl Magen wie Darm liegt, und entspringt ventral von der Wirbelsäule. Mit der Zunahme der Darmlänge kommt es zu einer vielfachen Schlängelung des Darmes.

Drüsen. Im Verlauf des Darmkanals treten zahlreiche Drüsen als Anhangsorgane auf, von denen wir die der Mundhöhle schon besprochen haben. Ursprünglich mit dem Schlunde durch einen offenen Ausführgang verbunden war die Schilddrüse (Glandula thyreoidea). Nach Rückbildung dieses Ganges erfolgte ein Funktionswechsel, indem nunmehr eine innere Sekretion einer jodhaltigen Eiweißverbindung eintrat, welche für das Zentralnervensystem von der größten Bedeutung ist, während nach anderer Auffassung die Funktion der Schilddrüse eine andere ist, nämlich im Körper sich bildende Giftstoffe aufzusammeln und unschädlich zu machen. Die Schilddrüse entsteht ursprünglich als ein medialer Auswuchs der ventralen Kiemenhöhlenwand und besteht bei Säugetieren aus zwei häufig verbundenen Lappen.

Eine Drüse unbekannter Funktion ist die Thymusdrüse, die bei Säugetieren meist im Brustkorb, und nur bei einigen im Halse liegt, und bei jungen Tieren viel größer ist als bei erwachsenen. Sie entwickelt sich aus dem Epithel der dritten Kiemenspalte, das sich früher oder später von dem Epithel der Kiemenspalte und dem der Rachenspalte trennt. Dieses epitheliale Organ ist von Lymphzellen durchsetzt, die wahrscheinlich eingewandert sind. Besonders unter dem Einfluß der Geschlechtsreife unterliegt es einer Herabsetzung seiner Funktion.

Am Mitteldarm findet sich als größte Drüse die Leber. Sie entsteht als Ausstülpung des Mitteldarmepithels und wird durch eine Bauchfellduplikatur an der Körperwand befestigt. Ursprünglich ist sie eine Anhäufung tubulöser Drüsen. Indem aber diese schlauchförmigen Drüsen sich untereinander verbinden, werden sie teils zu den Gallengängen, teils zu den Leberläppchen, welche radiär angeordnet Zellen enthalten. In dem umgebenden Bindegewebe verlaufen Blutgefäße und Gallengänge. Fast stets ist die Leber in zwei Hauptlappen geteilt, von denen der rechte der größere ist. Meist sind drei große Gallengänge vorhanden, die sich schließlich zum Ductus hepaticus vereinigen. Die Gallenblase, die vielen Säugetieren fehlen kann, ergießt ihren Inhalt durch ihren Ductus cysticus genannten Ausführgang meist zusammen mit dem Ductus hepaticus in

einen in das Duodenum ausmündenden Ductus choledochus. Es kann aber auch die Gallenblase nur als eine Ausstülpung eines der großen Gallengänge erscheinen. Alsdann erfolgt die Verbindung der Leber mit dem Duodenum direkt durch einen anderen großen Gallengang.

In der Nachbarschaft der Leber liegt die Bauchspeicheldrüse (Pancreas) in der vom Duodenum gebildeten Schlinge. Ursprünglich sind drei Anlagen, eine dorsale und zwei ventrale vorhanden, die dann verschmelzen und eine kompaktere acinöse Drüse bilden. Ihr Ausführgang ist der Ductus Wirsungianus, der sich meist mit dem Ductus choledochus verbindet. Gelegentlich kann noch ein zweiter Ausführgang, der Ductus Santorinianus, erhalten bleiben.

2i) Atmungsorgane. Bei allen Wirbeltieren sind die Atmungsorgane aufs engste mit dem Vorderdarm verknüpft, und als Eingangspforten dienen bei Säugetieren Mund und Nase. Wie schon auseinandergesetzt, wird die Nasenhöhle durch eine Scheidewand in eine obere olfaktorische und eine untere respiratorische Region getrennt, welche letztere als Nasenrachengang durch die Choane in den Nasenrachenraum ausmündet. In den unteren Nasengang ragt die untere Nasenmuschel, Maxilloturbinale, herein, die nicht mit Riechepithel ausgekleidet ist, und als Luftfilter, sowie als Erwärmungs- und Befeuchtungsorgan dient. Diese Muschel ist entweder einfach oder doppelt gefaltet, auch eingerollt oder aber verästelt. Der weiche Gaumen scheidet vom Pharynx den unpaaren Nasenrachenraum ab. In diesen kann der Kehlkopf ganz oder teilweise hineinragen, und in der Regel liegt die Epiglottis dem Hinterrande des Velums auf. Damit wird ein Kanal gebildet, der von der Nasenöffnung durch den Nasenrachengang direkt in die Lungenwege führt. Diese intranariale Lage des Kehlkopfeinganges ist bei manchen Tieren (besonders den Walen) eine sehr ausgeprägte, so daß der Zugang zur Speiseröhre durch den weit in den Nasenrachenraum ragenden Kehlkopf in eine rechte und eine linke Abteilung getrennt wird. Bei extranarialer Lage des Kehlkopfeinganges liegt dieser dennoch unterhalb des Nasenrachenraumes, so daß auch hier die Atmung wenigstens bei ruhigem Atmen durch die Nase erfolgt, und nur bei beschleunigter Atmung durch den Mund.

Kehlkopf. Der Kehlkopf der Säugetiere ist gekennzeichnet durch das Auftreten des Schildknorpels, eine weitere Ausbildung des Kehlkopfdeckels (Epiglottis) und eine Komplikation der Muskulatur. Der Schildknorpel (Cartilago thyreoidea) entsteht durch Verschmelzung des zweiten und dritten Branchialbogens, bei Monotremen auch noch des ersten. Die eigentliche Grundlage des Kehlkopfes ist der Ringknorpel (Cartilago cricoidea), mit dem anfänglich die beiden Stellknorpel (Cartilagines arytaenioideae) zusammenhängen. Dorsal schiebt sich zwischen ihnen das Procricoid ein. Am Eingange des Kehlkopfes liegt, in eine ventrale Schleimhautfalte eingebettet, der Kehldeckel (Epiglottis), ursprünglich paarig angelegt, der sich beim Passieren der Nahrung als Schutz über den Eingang legen kann. Bei den Zahnwalen ist die Epiglottis besonders lang und ragt, zusammen mit den Stellknorpeln, weit in den Nasenrachenraum hinein. Im Innern des Kehlkopfes sind zwischen Schild- und Stellknorpeln die Stimmbänder ausgespannt, zwei elastische Membranen, die zwischen sich die Stimmritze lassen. Bei den Walen fehlen Stimmbänder, dennoch können ein paar Arten (Buckelwal, Mesoplodon) Töne von sich geben, so daß also die Lauterzeugung nicht ausschließlich an die Stimmbänder gebunden ist. Ueber den Stimmbändern kann sich die Schleimhaut taschenartig zu Kehlsäcken (Morgagnische Taschen) ausbuchten, von denen meist nur eine sich besonders entwickelt und als Resonanzapparat funktioniert (Anthropoide Affen). Auch an anderen Stellen des Kehlkopfes können zwischen dessen Knorpeln Schleimhautaussackungen auftreten, so erscheint bei manchen Affen (Brüllaffe) ein medianer Kehlsack, der in dem blasig aufgetriebenen Körper des Hyoids Platz findet, und auch bei manchen Hirschen und Antilopen findet sich ein medianer Kehlsack zwischen Epiglottis und Schildknorpel. Sehr kompliziert ist die Kehlkopfmuskulatur, bei der wir eine innere von einer gleichzeitig dem Pharynx zugehörigen zu unterscheiden haben.

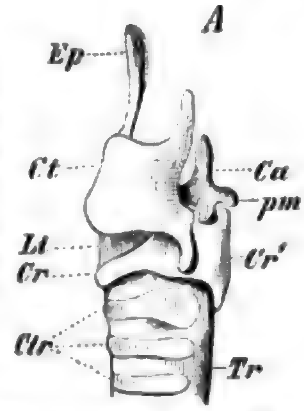


Fig. 28. Kehlkopf vom Reh. Ca Arytänoid, Cr Cricoid, Cr[1] Dorsale Platte des Cricoids, Ct Thyreoid, Ctr Trachealringe, Ep Epiglottis, Lt Ligamentum cricothyreoideum, Tr Trachea. Aus Wiedersheim.

Luftröhre (Trachea). Die Luftröhre wird durch meist unvollständige, dorsal offene Knorpelringe gestützt. Diese Ringe sind durch eine Membran miteinander verbunden und das Rohr ist innen mit Schleimhaut ausgekleidet. Die Länge der Trachea entspricht der des Halses, und in der Brusthöhle weicht sie in die beiden ähnlich gebauten Bronchi aus-

einander. Jeder Bronchus, Stammbronchus genannt, durchsetzt die gesamte Lunge bis zu ihrem Hinterende und gibt in zwei Reihen angeordnete Seitenbronchen ab, von denen die stärkeren ventral, die schwächeren dorsal liegen. Das durch fortgesetzte Teilung entstandene Kanalsystem ist der Bronchialbaum.

Lungen. Die Lungen entstehen wie bei allen Wirbeltieren als ventrale Aussackung des Vorderdarmes, die sich in Kehlkopf, Luft-

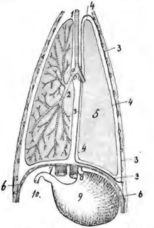


Fig. 29. Schematisierter Frontalschnitt durch die Brusthöhle eines Säugetieres. 1 Trachea, 2 sich verzweigender Bronchus, 3 Pleura parietalis resp. mediastinalis, 4 Pleura pulmonalis, 5 Lungenflügel, 6 Zwerchfell, 7 Vena cava posterior, 8 Aorta, 9 Magen, 10 Bauchhöhle. Nach Weber.

röhre, zwei Bronchien und Lungensäckchen differenziert. In letztere wächst der immer komplizierter sich verzweigende Stammbronchus hinein. Von den dorsalen Seitenbronchen kann der erste direkt aus dem Bronchus unterhalb der Abspaltung der Luftröhre, bei manchen Walen auch direkt aus der Luftröhre selbst entspringen. Die in der Lunge gelegenen Bronchien verlieren endlich die spärlicher werdenden Knorpelelemente ihrer Wandungen und bilden, feiner und feiner werdend, die Endbronchien, die in die Endbläschen einmünden. Deren dünne Wand ist mit zahlreichen Vorwölbungen, den Alveolen versehen, und diese werden von einem dichten Kapillarnetz von Blutgefäßen umsponnen. Hier findet der Gasaustausch statt. Ausgefüllt werden die Zwischenräume durch Bindegewebe, in welchem die Blutgefäße verlaufen. Die Zahl der Alveolen ist eine sehr beträchtliche. In der Menschenlunge beträgt sie etwa 150 Millionen, und ihre respiratorische Fläche ist auf 30 qm berechnet worden. Vielfach sind die Lungen gelappt, doch bleibt ihr innerer Bau dadurch unberührt, und diese Lappung kann daher als eine sekundäre Bildung angesehen werden.

Die frei in die Brusthöhle hängende Lunge wird außen von dem visceralen Blatt, der Pleura umgeben, das sich dann als parietales Blatt auf die Wand des Brustkorbes umschlägt. Jede Lunge liegt also in einem doppelwandigen Sack, der mit seröser Flüssigkeit gefüllt ist, und Formveränderungen der Lunge gestattet. Die Brusthöhle, in welcher sich beide Pleurasäcke befinden, ist durch das Zwerchfell von der Bauchhöhle geschieden. Die Atembewegung kommt zustande durch die Abflachung des kuppelförmig in die Brusthöhle vorgewölbten Zwerchfelles, womit gleichzeitig eine andere Erweiterung der Brusthöhle durch Auswärtsbewegung der Rippen erfolgt. Es wird dadurch in der Brusthöhle die schon von vornherein verdünnte Luft noch weiter verdünnt, und es strömt nunmehr durch den Atemweg Luft in die sich ausdehnenden Lungen. Durch die darauf folgende Verengerung der Brusthöhle durch Zwerchfell- und Rippenbewegung und die Bauchpresse wird das Ausatmen der Luft aus den Lungen bewirkt.

2k) Kreislaufsorgane. Die Organe des Kreislaufes stammen aus dem Mesoderm und werden in Herz, Gefäße, Blut und Lymphe gesondert.

Herz. Das Zentralorgan des Gefäßsystems ist das Herz, das bei den Säugetieren vierkammerig ist. Es dient wie bei allen Vertebraten als Saug- und Druckpumpe, und die das Blut zu ihm hinführenden Gefäße sind die Venen, die es fortleitenden die Arterien. Letztere haben eine dickere und reich mit glatten Muskelfasern versehene Wandung, während die Venen meist nur bindegewebige Wände besitzen. Die feinsten Verästelungen der Gefäße sind die Kapillaren. Das Blutgefäßsystem ist ein vollkommen geschlossenes. Die Wandung des Herzens besteht aus quergestreiften Muskelzellen und seine Innenräume werden von einer Schicht polygonaler Epithelzellen überzogen. Von den 4 Räumen des Säugetierherzens stellen 2 die beiden Herzkammern, die 2 anderen die beiden Vorkammern dar. Nach ihrer Lage unterscheidet man rechte und linke Herzkammer und rechte und linke Vorkammer. Der arterielle und der venöse Blutstrom sind im Herzen vollkommen voneinander getrennt, indem das arterielle Blut in die linke, das venöse in die rechte Herzhälfte strömt. Die Venen münden direkt in die rechte Vorkammer ein, da der Sinus venosus mit dieser verschmolzen ist. Jede Vorkammer steht mit der entsprechenden Kammer durch eine Oeffnung in Verbindung, die durch Klappen gegen den

Kammerraum geschlossen wird. Die des rechten Vorhofes ist eine dreiteilige, die des linken eine zweiteilige, und nur bei den Monotremen ebenfalls eine dreiteilige. In dem

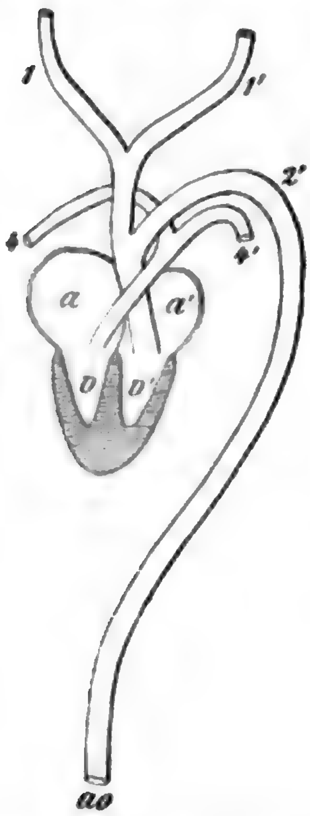


Fig. 30. Schema des Herzens und der Arterienbogen eines Säugetieres. a rechter, a' linker Vorhof, ao Aorta, s und s' Arterien zu den Vordergliedmaßen, v rechte, v' linke Herzkammer, 1, 1' 2, 2', 4, 4' Arterienbogen. Aus Boas.

rechten Vorhof treten 2 vordere Hohlvenen (Venae cavae anteriores) und eine hintere (Vena cava posterior) ein. Da der Sinus venosus in die Vorkammer einbezogen ist, sind die bei den anderen Vertebraten vorhandenen Sinusklappen umgebildet, doch erhält sich vielfach die der Vena cava posterior als Valvula Eustachii, während die Klappe der linken vorderen Hohlvene, die bei vielen Formen schwindet, die Valvula Thebesi, zeitweilig erhalten bleiben oder als Klappe der Kranzvene des Herzens funktionieren kann. Das venöse Blut tritt aus der rechten Vorkammer in die rechte Herzkammer und von da in die Arteria pulmonalis, welche das Blut zu den Lungen leitet, von wo es gereinigt wieder zum Herzen und zwar zum linken Vorhof zieht. Die Gefäße, welche das arterielle Blut von den Lungen zum Herzen leiten, sind die Lungenvenen, Venae pulmonales. Die 4 Lungenvenen vereinigen sich meist zu 2 Aesten, die bei den Monotremen sich zu einem einzigen Gefäß vereinigen, bei allen anderen Säugetieren getrennt bleiben. Die linke Herzkammer entsendet als arteriellen Hauptstamm die Aorta, die den Körper mit arteriellem Blut versorgt. Bei ihrem Austritt aus der Kammer bildet die Aorta eine Anschwellung, den Bulbus aortae, in welchem sich 3 halbmondförmige Klappen befinden, die ein Rückstauen des Blutes verhindern. Bei vielen Wiederkäuern, Tapir und Pferd kommen in den Faserringen, welche die Atrioventrikular- und Arterienöffnungen des Herzens stützen, insbesondere im Faserring der Aorta Knochenelemente, die sogenannten „Herzknochen" zur Ausbildung. Umgeben wird das Herz vom Herzbeutel (Pericardium), der aus der Cölomwand seinen Ursprung nimmt. Die beiden Blätter des Herzbeutels, das viscerale und das parietale fassen die seröse Höhle des Herzbeutels zwischen sich und das darin eingelagerte Herz vermag seine schlagenden Bewegungen glatt auszuführen.

Gefäßsystem. Das Gefäßsystem der Säugetiere zeigt folgende Grundprinzipien. Es läßt sich ein kleiner oder Lungenkreislauf von einem großen oder Körperkreislauf unterscheiden. Von dem Aortenbogen gehen in großer Mannigkaltigkeit des Entspringens die großen Arterien für den Kopf (Carotiden) und die Vorderextremitäten (Subclavien) ab. Entweder entspringen diese Gefäße getrennt oder sie treten zu den verschiedensten Verbindungen zusammen, bald entstehen sie alle von einem gemeinsamen Stamme, dem Truncus anonymus, bald mit je einem gemeinsamen Stamme für rechte und linke Körperhälfte, oder dieser gemeinsame Stamm findet sich nur an der rechten Seite, auch können beide Subclavien selbständig entspringen, beide Carotiden dagegen von einem unpaaren Stamme und so fort.

Die zum Hals und Kopf ziehende Carotis communis teilt sich in die zum Gehirn ziehende Carotis interna und die die äußeren Kopfteile versorgende Carotis externa. Eine interessante Anpassung an das Tauchen in große Tiefen zeigen die Wale, bei denen die Carotis interna obliteriert, um ein Komprimieren derselben durch den enormen Druck des Wassers beim Tauchen zu vermeiden: dafür wird das Gehirn dieser Tiere von den Gefäßen des Wirbelkanals aus versorgt, in denen sie vor dem Wasserdruck geschützt sind. Die Subclavia versorgt die Vorderextremität, wird auf diese übertretend zur A. axillaris und im Oberarm zur A. brachialis. Diese teilt sich in 2 Aeste die A. ulnaris und A. radialis. Letztere beiden sind aber später entstanden, denn ursprünglich wurden die Hohlhand und die Finger von einer unpaaren medianen Arterie versorgt, die sich später rückbildete. Der Hauptstamm der Aorta läßt einen thoracalen und einen abdominalen Abschnitt unterscheiden, und die von ihm abgehenden Gefäße waren ursprünglich segmental angeordnet, was sich dann später verwischt hat. Es werden von diesen Gefäßen sowohl die Eingeweide der Brust und Bauchhöhle als auch die Körperdecken versorgt. Das Ende der Aorta wird von der Schwanzarterie gebildet. In die Hinterextremitäten

tritt die A. iliaca externa ein, während ein anderer Ast des gemeinsamen Anfangsstückes, die Iliaca interna, für die Beckeneingeweide bestimmt ist. Die A. iliaca externa wird im Oberschenkel zur A. femoralis, doch war das ursprüngliche Hauptgefäß der hinteren Gliedmaßen die A. ischiadica, die weiter kaudalwärts von der Aorta entspringt. Am Unterschenkel finden sich die Arteria tibialis antica und postica, die aber ebenso wie die Vorderarmarterien erst sekundär entstanden sind.

Das Venensystem der Säugetiere weicht dadurch von dem der niederen Vertebraten ab, daß die untere paarige oder unpaare Hohlvene vor der oberen überwiegt, und daß bei der Mehrzahl die Vena azygos und V. hemiazygos, welche dem vorderen Abschnitt der Kardinalvenen entsprechen, sich zu einer einzigen Vene vereinigen, die in die obere Hohlvene einmündet.

Anschließend wollen wir dem Kreislauf bei Säugetierembryonen eine kurze Betrachtung widmen. Der embryonale Blutkreislauf unterscheidet sich von dem des geborenen Tieres sehr erheblich, schon durch die Blutzirkulation in den Eihäuten. Das aus paariger Anlage entstandene Herz entsendet nach vorn den



Fig. 31. Schema der Arterienbogen. Die Arterienbogen der Säugetiere sind schwarz ausgefüllt. a Aortenwurzel, a¹ Aorta dorsalis, c¹ Carotis interna, c, c¹ Carotis externa, sd, ss Subclavia dextra und S. sinistra, p Arteria pulmonalis, b Ductus Botalli. Nach Boas.

Truncus arteriosus, vom dem jederseits 6 Arterienbogen abgehen, die sich folgendermaßen verhalten. Die vordersten beiden werden bald reduziert, aus dem vierten entwickelt sich der linke Aortenbogen, der für die linke Vorderextremität die A. subclavia sinistra abgibt, während rechts die A. subclavia dextra entsteht. Jederseits bildet sich ferner die Carotis aus, deren äußerer Ast aus dem dritten Arterienbogen entsteht. Aus dem sechsten Arterienbogen wird die Lungenarterie, die links noch mit dem Aortenbogen durch den Ductus Botalli verbunden ist, der später obliteriert. Aus der definitiven Aorta entspringen die beiden Arteriae omphalo-mesentericae zum Dottersack. Später bilden sich die zur Allantois ziehenden Art. umbilicales aus. Von Venen erscheinen beim Embryo die Jugular- und die Kardinalvenen, die sich jederseits im Ductus Cuvieri vereinigen. Der später mit der rechten Vorkammer verschmelzende Sinus venosus nimmt letztere sowie die Dottersackvenen auf. Die beiden Venae umbilicales führen das venöse Blut der Allantois in die Ductus Cuvieri, und die rechte vereinigt sich mit dem gemeinsamen Stamm der Dottersackvenen zu einer Vena hepatica communis, aus der sich die Vena cava posterior entwickelt. Letztere verbindet sich mit dem hinteren Abschnitt der beiden Kardinalvenen, deren Blut sie teilweise aufnimmt. Die vorderen Abschnitte der beiden Kardinalvenen, welche den Zusammenhang mit ihren hinteren Abschnitten aufgeben, werden auf der rechten Seite zur Vena azygos, die in den rechten Ductus Cuvieri einmündet, während der vordere Teil der in den linken Ductus Cuvieri einmündenden vorderen Kardinalvenen zur Vena hemiazygos wird. Bei manchen Säugetieren kann die eine, bei anderen die andere schwinden. Die Jugularvenen wandeln sich ebenfalls um. Sie nehmen das venöse Blut der Vena subclavia aus den Vorderextremitäten auf, bei vielen Säugetieren verliert aber die linke Jugularvene den Zusammenhang mit dem linken Ductus Cuvieri und tritt mit der rechten Jugularvene in Verbindung, zusammen die obere Hohlvene bildend. Der linke Ductus Cuvieri wird zum Sinus coronarius cordis, der in das Herz einmündet, die Herzvene aufnehmend.

Blut. Im Blute unterscheidet man Plasma und zellige Elemente. Ersteres ist eine wasserklare eiweißhaltige Flüssigkeit, in der rote Blutkörperchen (Erythrozyten) und Lymphzellen (Leukozyten) suspendiert sind. Die roten Blutkörperchen sind bei den Säugetieren kernlose bikonkave Scheibchen, die von kernhaltigen Blutzellen abstammen. Als Bildungsstätten der roten Blutkörperchen kommt das Knochenmark in erster Linie in Betracht. Eine Abweichung in der Gestalt der Blutkörperchen zeigen nur die Cameliden, bei denen sie oval und bikonvex sind.

Die Leukozyten sind frei bewegliche Körperzellen, Wanderzellen des Bindegewebes, die in die Blutbahn gelangen können und soweit zu Blutzellen werden als es ihrer speziellen Anpassung an bestimmte Funktionen entspricht. Außer roten Blutkörperchen und Lymphzellen sind im Blute noch die Blutplättchen (Thrombocyten) vorhanden, flache, kernhaltige Scheibchen, welche bei der Blutgerinnung eine besondere Rolle spielen.

Lymphgefäßsystem. Lymphe. Während das Blutgefäßsystem vollkommen abgeschlossen ist, steht das Lymphgefäßsystem mit Cölomräumen, interzellulären Räumen usw. in Verbindung. Die Lymphe besteht aus einer Flüssigkeit, dem Plasma, und darin suspendierten Lymphzellen, Leukozyten, die eine amöboide Beweglichkeit besitzen. Die Lymphgefäße nehmen ihren ersten Ursprung von der endothelialen Auskleidung der Venen des Embryos und sind zunächst paarig und symmetrisch angelegt. Die zunächst auftretenden blind endigenden Sprossen fließen später zu kontinuierlichen Kanälen zusammen. Eine Verbindung mit dem Blutgefäßsystem erfolgt durch den Ductus thoracicus, der paarig sein kann, meist aber nur auf der linken Seite

persistiert, und in die linke Vena anonyma einmündet. Um das Zurückfließen der Lymphe zu verhindern, finden sich in den Lymphgefäßen Klappeneinrichtungen. Zum Lymphgefäßsystem gehören auch die Chylusgefäße des Darmes, welche die verdaute Nahrung aufsaugen und in den Ductus thoracicus eintreten. In Verbindung mit dem Lymphsystem stehen die Lymphdrüsen, Komplexe von Lymphfollikeln, die von einer gemeinsamen bindegewebigen Hülle umgeben sind. Daneben existieren durch Uebergänge miteinander verbunden auch Blutlymphdrüsen, in denen sich sowohl Lymphe als auch blutführende Räume befinden. Auch die Milz gehört hierhin, die meist als kompaktes Organ dem dorsalen Mesenterium anliegt. Daneben kann es zur Bildung von Nebenmilzen kommen. Man nimmt an, daß sie ein Lymphzellen produzierendes Organ ist. Wahrscheinlich werden in ihr auch, wie in den Blutlymphdrüsen die roten Blutkörperchen zerstört.

21) Geschlechtsorgane. Die Geschlechtsdrüsen entwickeln sich an der Wandung der Leibeshöhle aus dem diese auskleidenden Epithel. An der medialen Seite der Urniere sprossen Epithelstränge in das darunter liegende mesodermale Bindegewebe, an dessen Bildung sich die sich allmählich rückbildende Urniere beteiligt. Beim weiblichen Geschlechte bilden sich die

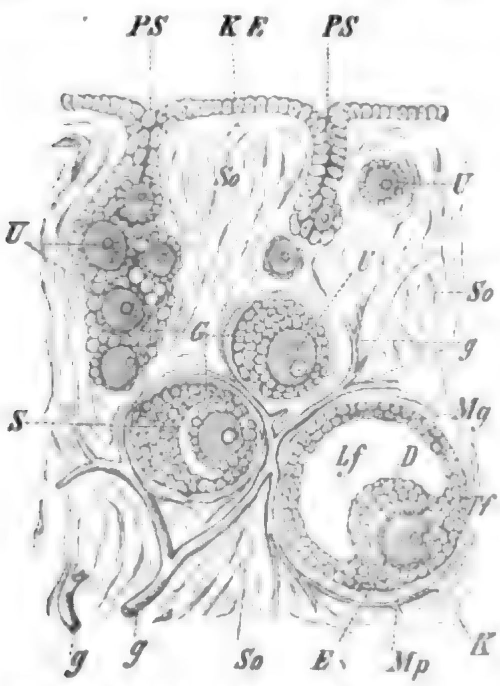


Fig. 32. Entwickelung der Graafschen Follikel bei Säugetieren. D Cumulus oophorus, E reifes Ei, KE Keimepithel, Lf Liquor folliculi, Mg Stratum granulosum, Mp Membrana pellucida, Ps Sexualstränge, S Spaltraum zwischen Follikelzellen (G) und Cumulus oophorus, So Stroma ovarii von Gefäßen g, g durchzogen, Tf Theca folliculi, U, U Urniere. Aus Wiedersheim.

paarigen Eierstöcke, die Ovarien aus, die als kleine aber kompakte Körper dorsal von den Nieren liegen. Aus den einwuchernden Epithelsträngen gehen die Graafschen Follikel hervor, in denen sich das Ei entwickelt. Bei den Monotremen, deren reife Eier sehr dotterreich sind, erscheinen die Follikel gestielt und das Ovarium traubig, und auch bei Marsupialiern findet man noch ähnliches, bei Monodelphiern aber sind die Eierstöcke kompakter, doch springen auch hier die reifen Follikel über die sonst glatte Oberfläche des Eierstockes hervor.

Im männlichen Geschlecht entwickeln sich in ähnlicher Weise die Hoden oder Testikel. Ihre Epithelstränge werden zu den samenbereitenden Samenkanälen, Tubuli

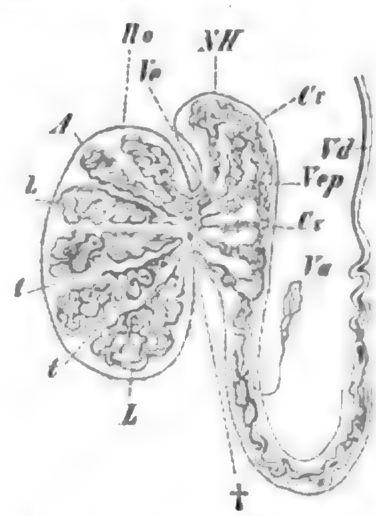


Fig. 33. Schema des Säugerhodens. A Tunica albuginea, t Septula testis, cv Lobuli epididymidis, Vep Ductus epididymidis, Ho Hoden, L, L Läppchen der Samenkanäle, NH Nebenhoden, Va Ductus aberrans, Vd Vas deferens, Ve Vasa efferentia. Aus Wiedersheim.

seminiferi, von denen sich je eine Anzahl nach geschlängeltem Verlauf in einem sogenannten Tubulus rectus vereinigt, dessen Bildung nach der Ansicht der einen vom Keimepithel, der anderen von einem als „Geschlechtsniere" bezeichneten Teil der Urniere erfolgt. Der gesamte Hoden wird umgeben von einer fibrösen Hülle, welche ins Innere des Hodens zahlreiche Blätter sendet, wodurch der Hoden in zahlreiche Hodenläppchen zerlegt wird. Diese fibröse Hülle durchsetzt ferner den Hoden entweder in der Mitte oder am Vorderende mit einem dichten Strange, in welchem auch die zu einem Netzwerk zusammentretenden Tubuli recti liegen und bildet zusammen mit diesem Netzwerk das Rete Halleri.

Die Spermien entstehen in der Wandung der Tubuli seminiferi, und zwar bilden sich zunächst Samenmutterzellen aus, aus denen durch wiederholte Teilung die Spermato-

zyten entstehen. Erst aus diesen entstehen durch Teilung die Spermatiden, von denen jede sich in eine Spermie umwandelt. Bei den meisten Säugetieren tritt eine Verlagerung der Hoden von ihrer Ursprungsstätte ein, der Descensus testiculorum. Die Wanderung erfolgt längs eines zur Haut der Leistengegend ziehenden Bandes, des Gubernaculum Hunteri, und endigt meist damit, daß die Hoden durch einen die Bauchwand durchsetzenden Kanal, den Inguinalkanal, in peritoneale Bruchsäcke eintreten, und damit die Bauchhöhle verlassen. Diese Bruchsäcke werden in der Umgebung des Penis in die Genitalwülste oder den Hodensack ausgestülpt. In den meisten Fällen erfolgt dann eine Verwachsung der Wände des Inguinalkanals, durch welche der Hoden in den Bruchsack gewandert ist, und alsdann ist die Verlagerung eine dauernde. Es gibt aber auch Fälle, in denen sich die Hoden wieder zu bestimmten Zeiten oder willkürlich in die Leibeshöhle zurückziehen können (so bei den Nagern, vielen Insektenfressern u. a.). Ferner gibt es Säuger, bei denen die Hoden dauernd in der Bauchhöhle verbleiben und zwar fehlt diesen dann entweder der Inguinalkanal und das Gubernaculum Hunteri (so bei Monotremen, beim Elefant, bei manchen Insektivoren, beim Klippschliefer usw., auch beim Ameisenbär und Faultier) oder der Descensus ist sekundär rückgebildet und die Hoden sind nach der vorderen Bauchwand verlagert wie bei den Cetaceen und Sirenen.

Die Geschlechtsgänge stehen in inniger Beziehung zu der Urniere. Die Urniere, welche der bei Säugetieren nur ganz vorübergehend auftretenden bald rudimentär werdenden Vorniere folgt, ist ein aus dem Epithel der Leibeshöhle entstandenes Exkretionssystem, aus zahlreichen transversalen Kanälchen bestehend, welche jederseits in einen gemeinsamen Längskanal, den Urnierengang einmünden. In ihrem kranialen Teile wird die Urniere durch eine Funktionsänderung in ein Organ umgewandelt, das mit der Geschlechtsdrüse in innige Beziehungen tritt, und wird alsdann als „Geschlechtsniere" bezeichnet. Die beiden Urnierengänge, auch Wolffsche Gänge genannt, münden in einen als Sinus urogenitalis bezeichneten Raum. Letzterer ist entstanden aus dem Anfangsteil der Allantois, der an die Kloake angrenzt. Der Sinus urogenitalis mündet also anfänglich in die entodermale Kloake ein, und es erfolgt erst innerhalb der Säugetierklasse eine Trennung der entodermalen Kloake in Dickdarm und Sinus urogenitalis, indem gleichzeitig mit der Ausbildung der entodermalen Kloake durch schwanzwärts einwucherndes mesodermales Gewebe ein Damm, Perinaeum, zwischen beiden gebildet wird. Bei Monotremen, welche eines Sinus urogenitalis entbehren, finden sich noch ursprüngliche Zustände, vor allem aber bleibt eine Kloake bestehen, deren rein ektodermaler Anteil auch noch bei den weiblichen Marsupialiern sowie manchen Placentaliern angedeutet ist. Verfolgen wir nunmehr die Ausbildung der Ausführgänge beim weiblichen Geschlecht, so sehen wir 2 Kanäle nach innen von den Wolffschen Gängen auftreten: die Müllerschen Gänge. Sie entstehen entweder durch Abspaltung vom Wolffschen Gange oder direkt aus dem Leibeshöhlenepithel. Eine trichterförmige Oeffnung in die Leibeshöhle ist das Ostium abdominale tubae. Die äußere Mündung der Müllerschen Gänge erfolgt in den Sinus urogenitalis, nach innen von den rudimentär werdenden Wolffschen Gängen, mit denen vereinigt sie nach abwärts ziehen.

Die Müllerschen Gänge werden zu den Ausführwegen der weiblichen Geschlechtsprodukte. Bei den Monotremen münden sie noch vollkommen getrennt in die Kloake und lassen jederseits ein distales Stück, die Vagina, und ein proximales, den Eileiter, unterscheiden.

Bei den Beuteltieren kommt noch ein dritter mittlerer Abschnitt, der Uterus hinzu, der bei den Monotremen kaum angedeutet ist, und außerdem beginnt eine Verschmelzung der Müllerschen Gänge von ihrem distalen Ende her aufzutreten, so daß die Vaginae mehr oder minder verschmolzen sind. Diese Verschmelzung kann zur Bildung eines Blindsackes, der sogenannten unpaaren Vagina führen, die bei manchen Formen (Macropus) zur Zeit der Geburt oder für immer in den Sinus urogenitalis durchbrechen kann, wodurch ein Geburtsweg für das Junge entsteht.

Der ursprünglich nicht scharf von der Vagina abgegrenzte Uterus erhält bei höheren Formen eine schärfere abgesetzte Mündung, den Muttermund. Bei den Placentaliern tritt eine weiter gehende Verschmelzung der Müllerschen Gänge ein. Sinus urogenitalis und die einheitlich gewordene Vagina bilden einen gemeinsamen Kanal und es treten nun auch verschieden weit gehende Verschmelzungen der beiden Uteri ein. Bei manchen Monodelphiern (Orycteropus, einige Chiropteren und Nager, Elefant) sind sie noch völlig durch ein Septum getrennt und haben eigene Ausmündungen. Diesen Zustand nennt man Uterus duplex. Durch Verschmelzung von der kaudalen Seite her entsteht ein gemeinsamer Hohlraum, Corpus uteri, welcher natürlich nur mit einer Oeffnung in die Vagina einmündet. Sind die beiden Uteri nur in geringer Ausdehnung miteinander verschmolzen, wie bei den Carnivoren, dem Schwein, manchen Fledermäusen usw., so spricht man von einem

Uterus bipartitus. Ist die Verschmelzung bedeutender, so daß die unverschmolzenen Teile der beiden Uteri wie Hörner dem Uteruskörper aufsitzen, so spricht man von einem Uterus bicornis, und bei völliger Verschmelzung entsteht der Uterus simplex der höheren Affen und des Menschen. Die Verschmelzung reicht kopfwärts nicht hinaus über die zur Befestigung des Uterus dienenden „runden Mutterbänder". Der kraniale Abschnitt der Müllerschen Gänge ist der Eileiter, Oviduct. Ein oft weiter Trichter, das Ostium abdominale tubae, öffnet sich in die Bauchhöhle, um die reifen Eier aufzunehmen. Das Ei muß also durch die Bauchhöhle wandern, um in die Eileiter zu gelangen. Während nun bei vielen Formen (besonders den Affen und dem Menschen) die Ueberleitung nicht besonders gesichert ist, finden sich bei anderen Säugern gewisse Vorrichtungen, um die Aufnahme des reifen Eies in die Tube zu gewährleisten. Solche Einrichtungen sind entweder eine Vergrößerung des Tubentrichters, der das Ovarium umfassen kann (Beuteltiere, Wale) oder Verkleinerung der Fläche des Ovariums, auf der die Eier austreten, oder aber die Ausbildung einer besonderen Ovarialtasche, die dem Bauchfellüberzug der Tube entstammt und entweder durch eine verschieden weite Oeffnung mit der Bauchhöhle in Verbindung steht, oder aber vollkommen geschlossen ist, so daß das Ei von vornherein einen von der Bauchhöhle abgeschlossenen Raum durchwandert (Maus, Fischotter).

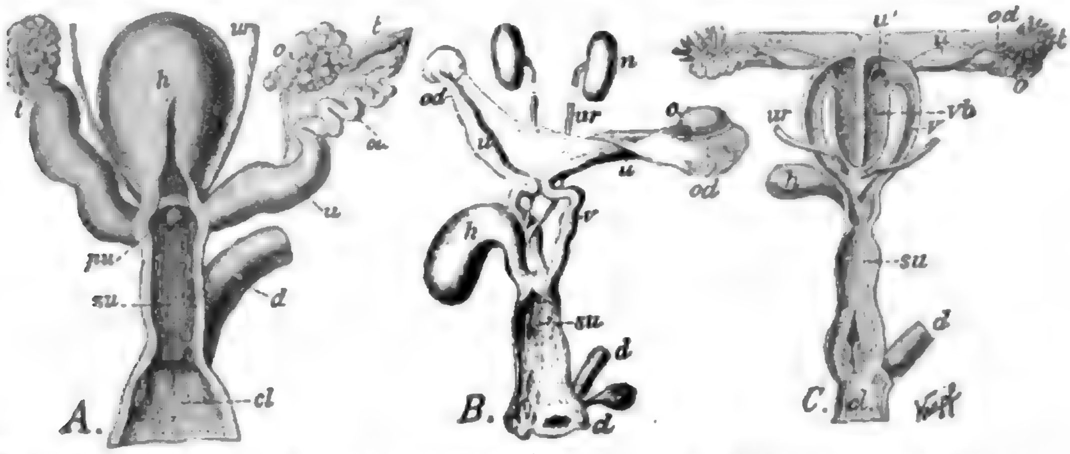


Fig. 34. Weiblicher Geschlechtsapparat. A Echidna, B Didelphys, C Phascolomys. cl Kloake, d Darm, h Harnblase, n Niere, o Ovarium, od Ovidukt, pu Ureterenmündung, su Canalis urogenitalis, s Ostium abdominale tubae, u Uterus, ur Ureter, v Vagina, vb Blindsack. Aus Weber.

Wir gehen nunmehr zur Betrachtung der Geschlechtsausführgänge der männlichen Tiere über. Die Wolffschen Gänge sind beim Weibchen rudimentär und nur gelegentlich in Resten als sogenannte Gartnersche Gänge enthalten, beim Männchen dagegen bilden sie sich zu den Samenleitern aus, während die Müllerschen Gänge rudimentär werden. Während bei den Anamniern die Wolffschen Gänge noch als Harnsamenleiter funktionieren, tritt bei den Säugetieren wie den anderen Amnioten eine besondere Niere, die Metanephros, mit einem eigenen Ausführungsgange, dem Ureter auf, und die Urniere gibt die bisherige Funktion als harnbereitendes Organ auf und behält im männ-

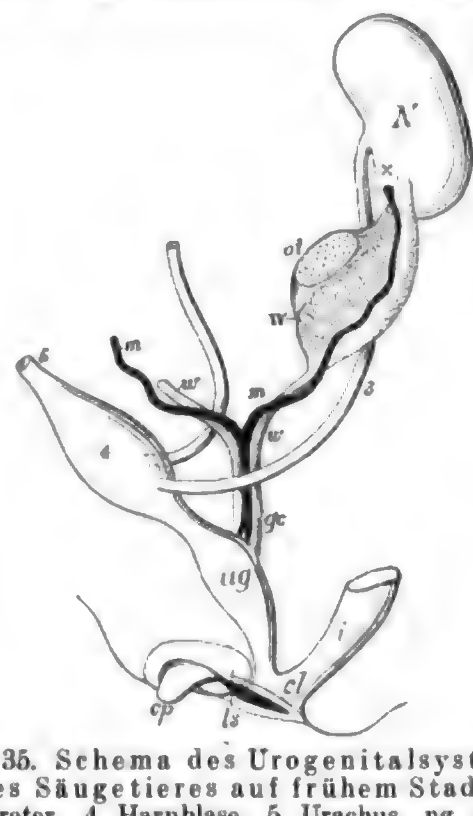


Fig. 35. Schema des Urogenitalsystems eines Säugetieres auf frühem Stadium. 3 Ureter, 4 Harnblase, 5 Urachus, ng Sinus urogenitalis, cl Kloake, i Enddarm, ep Genitalhöcker, ls Anlage des Hodensacks, ot Geschlechtsdrüse, W Wolffscher Körper, x dessen oberes Ende, w Wolffsche Gänge, m Müllersche Gänge, gc Vereinigung beider zum Genitalstrang. Aus R. Hertwig.

lichen Geschlecht nur die Funktion als Geschlechtsniere. Bei den Säugetieren bildet sie den sogenannten „Kopf" des Nebenhodens, und der Wolffsche Gang schließt sich als Körper und Schwanz des Nebenhodens daran an, um weiter zum eigentlichen Vas deferens zu werden, das in den Sinus urogenitalis mit einem häufig verengerten Endstück, dem Ductus ejaculatorius, ausmündet. Die Mündungen liegen meist als Schlitze auf einer Erhebung des Sinus urogenitalis, dem Colliculus seminalis. Die in Resten erhalten gebliebenen Müllerschen Gänge öffnen sich zwischen den Samenleitern in den Sinus urogenitalis und werden als Uterus masculinus oder Vesicula prostatica bezeichnet.

Mit dem männlichen Geschlechtsapparat treten akzessorische Drüsen, in Verbindung, von denen die sogenannten Samenblasen (Vesiculae seminales) dem Vas deferens zugehören, aber nicht, wie man früher irrtümlich annahm, als Samenbehälter funktionieren. Die bei manchen Gruppen vorkommenden Glandulae vasis deferentis erscheinen meistens als die verdickte „Ampulle" des Samenleiters, und liefern teils ein Sekret, das sich dem Sperma beimengt, teils dienen sie als Samenbehälter. Die Glandulae urethrales in der Wand des Sinus urogenitalis sind der Ausgangspunkt für die stets vorhandenen Glandulae prostaticae, die einen als Prostata bezeichneten kompakten Körper bilden können, und auch die meist vorhandenen Cowperschen Drüsen stammen ebendaher, denen beim weiblichen Geschlecht die Bartholinische Drüse entspricht, deren Sekret den Scheidenvorhof schlüpfrig macht.

Befruchtung. Die Befruchtung der Säugetiere ist durchweg eine innerliche und erfolgt immer im Anschluß an eine Begattung. Sie wird durch ein besonderes Kopulationsorgan, den Penis, besorgt, der aus einer Geschlechtshöcker genannten Verdickung an der vorderen Wand des Sinus urogenitalis entsteht. Der Penis der Säugetiere besteht aus einem mehr oder weniger paarigen fibrösen Körper, dem Corpus fibrosum, der durch starke Ausbildung von Gefäßen in verschiedenem Maße schwellbar wird, und ferner einem zweiten ebenfalls schwellbaren, aber nicht fibrösen Körper, der den Leitungsweg für das Sperma umgibt und Corpus spongiosum heißt. Dieser Körper ist im allgemeinen unpaar, doch läßt sich bei den Beuteltieren eine paarige Anlage nachweisen. Er ist in eine ventrale Längsrinne des fibrösen Körpers eingelassen. Während aber bei den Sauropsiden das Corpus spongiosum eine Längsrinne darstellt, in welcher der gleichfalls rinnenförmige Samenleiter verläuft, ist es bei den Säugetieren ein hohler Zylinder geworden. In ihm liegt das Samenrohr, das mit Ausnahme der Monotremen nicht nur den Samen, sondern auch den Harn nach außen zu leiten hat. Bei den Monotremen ist der Penis noch in einer Tasche der Kloake gelegen. Bei den übrigen Säugern dagegen ist seine Ablösung vom Kloakenraum durchgeführt und es tritt eine allmählich fortschreitende Verlagerung an die Körperoberfläche und Bekleidung mit äußerer Körperhaut auf. Indem das Integument in derartige Beziehungen zum Penis tritt, können auch ursprünglich ektodermale Partien der äußeren Bedeckung des Penis durch starke Gefäßbildung schwellbar werden, und besonders an dem freien Ende des Penis kann sich eine solche Anhäufung schwellbaren spongiösen Gewebes bilden, die als Glans penis oder Eichel bezeichnet wird, die sekundär zum Corpus spongiosum in Beziehung treten kann. Doch kann letztere Bildung auch primär vom Corpus spongiosum ihren Ausgang nehmen. An der Glans penis finden sich besondere Nervenendigungen, die Wollustkörperchen und meist ist dieses Organ umgeben von einer Faltenbildung der Haut, dem Präputium oder der Vorhaut, die in verschiedenem Maße ausgebildet ist, und auch völlig fehlen kann. Beim weiblichen Geschlechte entspricht dem Penis morphologisch die Clitoris, die manche wesentlichen Merkmale des Penis in reduziertem Maßstabe wiederholen kann. In einigen Fällen (Prosimier, viele Nager) ist sie sogar von der Harnröhre durchbohrt.

Bei den Säugetieren mit mehr aufrechter Körperhaltung, den Chiropteren sowie den Prosimieren und Primaten rückt die Präputialöffnung vom After aus kopfwärts. Es löst sich dann aber ein Teil des Präputialschlauches von der Bauchwand und hängt frei herab, in der Ruhe kaudalwärts gerichtet. Das ist der Penis pendulus.

Wenn die paarigen Anlagen des Corpus fibrosum nicht völlig miteinander verschmolzen sind, findet sich dazwischen ein bindegewebiger Streifen, das Septum corporis fibrosi. In dem sich terminalwärts in die Glans erstreckenden Teil dieses Septums kann ein Verknöcherungsprozeß auftreten und einen „Penisknochen" bilden.

Bei den Monotremen dient der Penis nur zum Transport des Spermas und nicht des Urins, und das Samenrohr mündet nicht mit einer Oeffnung aus, sondern mit zahlreichen feinen verzweigten Röhrchen auf Papillen der Penisspitze. Bei den Beuteltieren ist dagegen der Samenweg wie bei den Placentaliern gleichzeitig zur Ausleitung des Harns bestimmt, und kann als Sinus urogenitalis masculinus bezeichnet werden. Viele Beutler weisen einen an der Spitze in verschieden hohem Grade gegabelten Penis auf, in Uebereinstimmung mit der doppelten Vagina der weiblichen Tiere. Bei den Placentaliern ist hervorzuheben, daß der ungegabelte Penis stets mit dem Becken durch die Crura corporis

fibrosi verbunden ist. Eine Glans kann vorkommen oder fehlen, ebenso ein Penisknochen. Auch kann die Mündung des Präputiums mit dem Rektum zu einer Art Kloake vereinigt sein (z. B. beim Biber) oder aber sie kann sehr weit nach vorn gelagert sein (viele Ungulaten). Dazwischen finden sich alle möglichen Uebergänge. Auch in der relativen Größe des Penis sind erhebliche Unterschiede vorhanden, was sich auch innerhalb einer Ordnung wahrnehmen läßt, so ist der Penis bei den Faultieren sehr klein, bei den Gürteltieren außerordentlich groß. Bei den Perissodactylen zeichnet sich der Penis durch bedeutende Dicke aus, dagegen ist er bei den Artiodactylen lang, aber dünn, und häufig findet sich auch eine Drehung der Penisspitze nach links. Bei den Walen ist der Penis im Ruhezustand durch zwei auch sonst vorkommende Rückziehmuskeln in die tiefe Penisscheide eingezogen. Das immer wieder behauptete Vorkommen eines Penisknochens bei Walen ist ein Irrtum. Es ist nicht einmal ein Septum corporis fibrosi vorhanden. Bei Pinnipediern dagegen wie auch bei vielen Carnivoren kommt ein oft sehr kräftig ausgebildeter Penisknochen vor, auch Insektivoren, Nager und Primaten, darunter sogar die anthropoiden Affen besitzen ihn. Die Gestalt des Penisknochens ist übrigens für die einzelnen Arten charakteristisch, so daß er als systematisches Merkmal Verwendung finden kann.

zm) Exkretionsorgane. Wie die anderen Amnioten, so haben auch die Säugetiere als harnabscheidende Organe die „bleibenden Nieren" (Metanephros). Die entwickelungsgeschichtlich vorausgegangene Urniere (Mesonephros) funktioniert nicht mehr als Exkretionsorgan, und tritt beim männlichen Geschlecht als „Geschlechtsniere" mit dem Geschlechtsapparat in Beziehung. Die Metanephros, ein kompaktes glattes bohnenförmiges Organ, entsteht aus zwei verschiedenen Anteilen. Von jedem Wolffschen Gang aus bildet sich ein hohler, blind endigender Auswuchs, der Ureter, der kopfwärts wächst, und in den anderen Anteil der Niere eindringt, der von der kaudalen Region der Urniere aus sich entwickelt. Der Ureter bildet in dem eigentlichen Nierenanteil zwei hohle, blind endigende Fortsätze und läßt aus diesen die Sammelröhren aussprossen, während vom eigentlichen Nierenanteil heraus die Nierenkörperchen, Glomeruli, und gewundenen Kanälchen, Tubuli contorti, entstehen. Die Säugetierniere stellt sich also dar als eine tubulöse Drüse, deren sekretorischer Teil von der Urniere aus entsteht, während die Abfuhrkanäle aus dem Ureter, in letzter Linie also aus dem Wolffschen Gange hervorgehen. Der sekretorische Teil bildet in der Niere die Rinde, während die Marksubstanz die abführenden Kanäle enthält. Die sekretorischen Harnkanälchen der Niere beginnen mit dem sogenannten Malpighischen Körper, dem blindgeschlossenen Kanalende, in welches ein arterielles Wundernetz, der Glomerulus, eingestülpt ist. Dann ziehen die Harnkanälchen nach innen, sich schleifenförmig zurückbiegend, um schließlich in die Sammelkanäle der Marksubstanz einzutreten.

In die Einbuchtung der Niere, den Hilus, tritt der Ureter mit einer Erweiterung, dem Nierenbecken, ein, von dem aus einer oder mehrere größere Kanäle ausstrahlen können, in welche die ableitenden Kanäle einmünden.

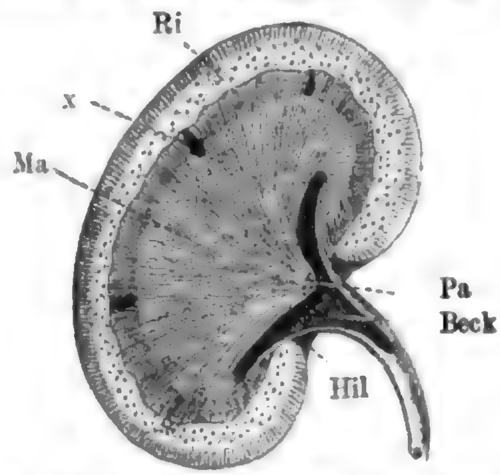


Fig. 36. Längsschnitt durch die Niere des Kaninchens. Ri Rinde, Ma Mark, x Unterbrechungen zwischen den Sammelkanälen, Pa Papille, Beck Nierenbecken, Hil Hilus. Aus K. C. Schneider.

Die Sammelkanäle, welche die Harnkanälchen aufnehmen, können sich wieder vereinigen und münden meist auf vorspringenden Papillen in das Nierenbecken ein.

Bei den Monotremen finden sich noch sehr einfache Zustände, so ragt bei Echidna eine einzige Papille ins Nierenbecken ein, und dieser Typus der „einfachen einwarzigen Niere" mit glatter Oberfläche findet sich auch bei Marsupialiern und niedrigen Monodelphiern von kleiner Körperform. Bei größeren Formen kann eine Komplikation dadurch eintreten, daß die Papille Seitenwülste entwickelt und gleichzeitig ein verzweigtes

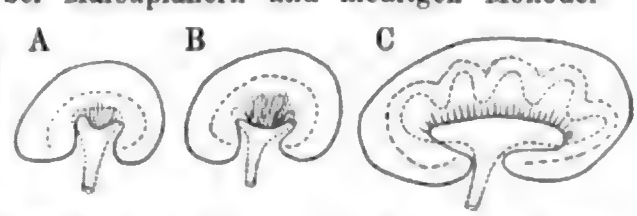


Fig. 37. Schemata von Nieren. A von einer einfachen einwarzigen Niere, B von einer einwarzigen mit Nebenpapillen und verzweigtem Becken, C von einer Leistenniere. Nach Gerhardt.

Nierenbecken entsteht. Ferner können sich schärfer abgegrenzte kegelförmige Markpartien, die Nierenpyramiden, ausbilden, die durch eingesenkte Rindenpartien getrennt werden, und die die Seitenwülste der Papille als Spitze haben. Auch kann die Papille sich nach einer Richtung hin strecken, so daß sie eine Leiste bildet. Solche „Leistennieren" finden sich besonders bei Carnivoren, Artiodactylen und Affen. Ein neuer Typus kann sich durch Auflösung der Leiste in einzelne Papillen ausbilden, und möglicherweise ist die menschliche Niere auf diesen Typus zurückzuführen. Die Gebiete der einzelnen Papillen sind in der menschlichen Niere scharf getrennt, und jede der von allen Seiten gegen den Sinus renis vorragenden Papillen wird von einer Ausstülpung des Nierenbeckens, einem

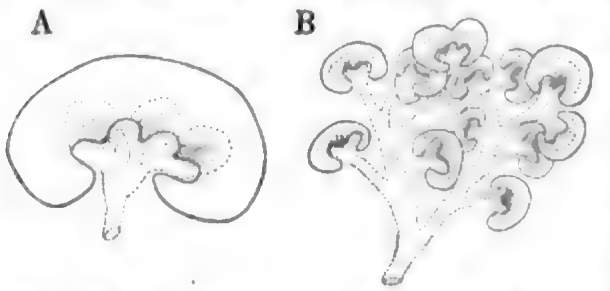


Fig. 38. Schemata von Nieren. A von der menschlichen Niere, B von der Rehculiniere. Nach Gerhardt.

Nierenkelch, Calyx renis, umfaßt. Mit der Zunahme der Verzweigung des Ureters sowie dem schärferen Einschneiden der die Nierenpyramide trennenden Rindenpartien, der Columnae bertini, kommt es zu einer weitgehenden Trennung der einzelnen Nierenportionen und es bildet sich die „zusammengesetzte Niere" aus, wie wir sie besonders bei den Walen finden. Auch die Pinnipediernniere besitzt einen stark verzweigten Ureter, doch ist die Oberfläche nur relativ seicht gefurcht, und zahlreiche Columnae bertini durchziehen netzförmig die Niere, in den Maschen Marksubstanz einschließend. Dieser Nierentypus ist also etwas abweichend von dem der „zusammengesetzten Niere" der Wale gestaltet, wenn auch in beiden Typen

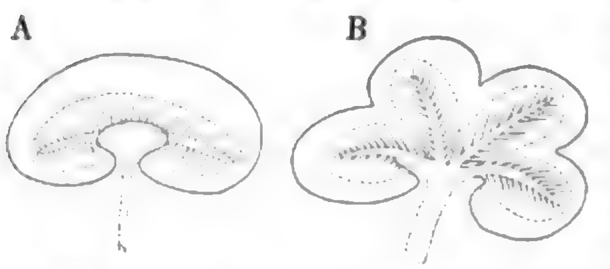


Fig. 39. Schemata von Nieren. A vom Pferd, B vom Elefanten. Nach Gerhardt.

die sekretorische Oberfläche der Niere stark vergrößert wird. Einen anderen Aufbau hat die Niere von Pferd und Tapir, indem hier der Ureter sich in zwei lange Gänge, Recessus terminales, fortsetzt, in welche die Sammelröhrchen ohne irgendwelche Papillenbildung einmünden. Aehnliche Nieren haben auch einige Nager, und die Nieren von Nashorn, Flußpferd und Elefant schließen sich in ihrem Bau daran an; doch hat sich bei ihnen die Zahl der Recessus terminales auf 4 und 5 erhöht.

Es herrscht also im Auftreten der einzelnen Typen der Säugetierniere eine große Unregelmäßigkeit, und man hat bis jetzt nicht die biologischen Gründe für die verschiedene Ausgestaltung der Nieren finden können.

Umhüllt werden die Nieren von einer bindegewebigen Nierenkapsel. Die Harnleiter münden bei den Monotremen in die Kloake, bei allen anderen Säugern direkt in den Fundus der Harnblase. Die sackförmige Harnblase entsteht aus dem mittleren Teil des Allantoisstieles und dient als Reservoir für den Harn. Embryonal setzt sich der Allantoisstiel durch den Nabel in die eigentliche Allantois fort. Als Rest dieser Verbindung findet sich bei erwachsenen Tieren ein vom Blasenscheitel zum Nabel ziehender Strang, das mittlere Blasennabelband.

2n) Unterschiede der Geschlechter. Bei den Säugetieren sind die Unterschiede der Geschlechter im allgemeinen nicht besonders auffällig. Bei einigen Formen übertrifft das Männchen das Weibchen erheblich an Größe, so bei der Pelzrobbe des nördlichen stillen Ozeans, sowie beim Pottwal. In seltenen Fällen ist das Weibchen größer (Cephalophus, Tapirus, Bartenwale). Im Gebiß sind mitunter die Eckzähne beim männlichen Geschlecht stärker entwickelt (Gorilla) oder fehlen dem Weibchen (Pferd, manche Hirsche) oder werden beim Männchen zu immerwachsenden Zähnen (Hauer des Ebers). Auch Incisiven können beim männlichen Tier besondere Größe erreichen, so der Stoßzahn des Elefanten oder der des Narwals. Ein anderes Merkmal ist das Geweih der Hirsche, das nur beim Renntier in beiden Geschlechtern vorkommt, ferner die Mähne des männlichen Löwen, der Paviane, des Bisons usw., oder der Rückenkamm beim Gemsbock, der Bart des Ziegenbocks und mancher Affen u. a. m. Färbungsunterschiede sind selten und meist nicht auffällig. Ausnahmen machen manche männliche Paviane mit ihren buntgefärbten Gesichtern und Gesäßschwielen. Starkriechende Drüsen sind ebenfalls bei den Männchen mancher Säuger vorhanden, ebenso ist die Ausbildung einer stärkeren Stimme bei einigen zu konstatieren.

3. Embryologie. Das befruchtete Ei wird nur bei den Monotremen mit einer

pergamentartigen Schale umhüllt und nach außen abgelegt, die Entwickelung vollzieht sich also hier außerhalb des mütterlichen Körpers. Gegenüber dieser Oviparität der Monotremen, die als ein Erbstück niederer Vertebratenvorfahren zu betrachten ist, sind Beutler und Monodelphier vivipar, d. h. der Embryo macht einen verschieden großen Teil seiner Entwickelung im Uterus der Mutter durch. Nur das Ei der Monotremen ist reich an Nahrungsdotter und seine Furchung ist daher eine meroblastische, während die anderen Säugetiereier eine große Dotterarmut aufweisen und ihre Furchung daher eine holoblastische, annähernd äquale ist (vgl. den Artikel „Ei und Eibildung"). Es resultiert schließlich ein Haufen kugeliger Zellen, der durch Ausbildung eines Hohlraumes zu einer einschichtigen Zellenlage,

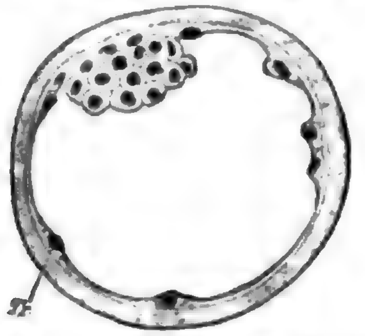


Fig. 40. Keimblase der Spitzmaus. Tr Trophoblast. Nach O. Hertwig.

dem Trophoblast, wird, der aber an einer Stelle einen ins Innere vorspringenden Zellhaufen aufweist, aus dem später der Embryo hervorgeht. In diesem Zellenhaufen ordnen sich die Zellen in drei Lagen an, von denen die innere zum Entoderm wird, die beiden äußeren zum Ektoderm. Es bildet sich dadurch die ovale Keimscheibe aus, die der Keimblase aufliegt. Meist in zentraler Lage erscheint dann in der Keimscheibe eine schwache Verdickung, der Primitivknoten, von dem bald nach der Peripherie der Keimscheibe zu eine leistenartige Verdickung hinzieht, der Primitivstreifen. In diesem tritt eine feine Längsrinne, die Primitivrinne, auf. Im Bereich des Primitivstreifens entwickelt sich das Mesoderm aus dem Entoderm und alle drei Keimblätter hängen hier zusammen.

Der sich rapid entwickelnde Embryo wird durch schon vorbereitete Nahrung ernährt, entweder durch Dotter oder es findet durch Vermittlung der Placenta eine direkte Ernährung von seiten des mütterlichen Organismus aus statt. Im Laufe der Weiterentwickelung erscheint der „Kopffortsatz", eine vom Primitivknoten nach vorn wuchernde Zellanhäufung. Damit beginnt die Entwickelung des eigentlichen Embryos, von der hier nur die Hauptphasen angegeben werden sollen: Es bildet sich ein feiner Kanal aus, der Notochordalkanal, der durch das Zentrum des Kopffortsatzes läuft, vorn blind endigt, hinten aber sich durch das Ektoderm öffnet. Letztere Oeffnung wird dem Blastoporus der übrigen Amniota für gleichwertig erachtet. Es finden sich also nunmehr zwei Höhlen in der Keimblase, die eine ist der als „Dotterhöhle" bezeichnete größere Hohlraum, die andere der eben erwähnte feine Kanal des Kopffortsatzes. Letzterer gewinnt durch Oeffnungen Verbindung mit der Dotterhöhle, und schließlich schwindet die beide Hohlräume trennende Wand vollständig. Es entsteht nunmehr ein einheitlicher Hohlraum, das Archenteron, umwallt von dem permanenten Entoderm. Der Blastoporus schließt sich. Mitunter teilt er sich in zwei Teile, von denen der vordere dem Canalis neurentericus den Ursprung gibt, der das Archenteron mit dem Medullarrohr verbindet, während der hintere zur Analöffnung wird, die zunächst durch eine Zellmembran geschlossen ist. Die Chorda dorsalis erscheint sehr frühzeitig angelegt. Sie entwickelt sich aus den Zellen der dorsalen Wand des Notochordalkanals. Das eigentliche Entoderm darunter schließt sich dann wieder. Bei Säugetieren erscheint die Chorda als breites, abgeplattetes, welliges Band. Mit der Ausbildung der aus dem Mesoderm entstehenden skeletogenen Schicht, aus welcher sich die Wirbelsäule entwickelt, verschwindet die Chorda allmählich in der Region der einzelnen Wirbel, erhält sich aber als Nucleus pulposus in den Zwischenwirbelscheiben. Das Archenteron vergrößert sich mit dem Wachstum des Embryos und bildet eine kopfwärts und eine schwanzwärts gerichtete Verlängerung, Kopf- und Schwanzdarm, aus denen sich der eigentliche Darmtraktus ausbildet. Das Nervensystem legt sich im dorsalen Ektoderm als Medullarplatte an, in deren Mittellinie eine dorsale Furche auftritt. Der Blastoporus wird zum Teil in die Medullarplatte eingeschlossen und kann eine Verbindung zwischen dem späteren Hohlraum des Zentralnervensystems und dem des Entoderms, den schon erwähnten Canalis neurentericus, bilden. Die Medullarplatte erhebt sich mit ihren seitlichen Rändern und bildet so die Medullarrinne, deren Bildung von vorn nach hinten allmählich fortschreitet. Schließlich verwachsen die Ränder zur Bildung des Medullarkanals, der vorn längere Zeit als feine Oeffnung, der Neuroporus, nach außen mündet. Etwa die Hälfte des primitiven Medullarkanals wird zum Gehirn, die andere zur Anlage des Rückenmarks. Aus der Wandung des Kanals nach beiden Seiten hin auswandernde Zellen bilden die Ganglien. Die Sinnesorgane des Geruchs, Gesichts und Gehörs stehen mit der Ausbildung von drei Paar kleinen abgegrenzten ektodermalen Verdickungen, den Plakoden, in Zusammenhang. Die Geruchsplakoden entstehen unterhalb des Vorderhirns, stülpen sich dann ein, erhalten eine zweite Oeffnung in der Mundhöhle, und differenzieren sich dann weiter.

Die Gesichtsplakoden liefern die Linsen des Auges, während die Retina und der Sehnerv vom Gehirn stammen, das zwei seitliche Blasen ausstülpt, die an das Ektoderm im Gebiet der nunmehr entstehenden Plakoden anstoßen. Durch Einstülpung der Augenblasen zu Becherform bildet sich als dessen innere Wand die Retina, als äußere deren Pigmentschicht, das Tapetum

nigrum, aus, während die Becheröffnung von der Linse erfüllt wird. Das Gehörorgan entsteht durch Invagination der Gehörplakode zu einer Grube, die sich bald zu einem epithelialen Bläschen schließt. Eine dorsalwärts ziehende Verlängerung bildet den Ductus endolymphaticus. Am ventralen Ende des Hörbläschens wächst ein langes, epitheliales Rohr aus, die Scala media cochleae des erwachsenen Tieres. Die dorsale Partie des Hörbläschens liefert die halbkreisförmigen Kanäle, die mittlere produziert den Utriculus, den zur Schnecke führenden Canalis reuniens und den Sacculus, einen Blindsack an der Vorderseite des Canalis reuniens. Bei der Entwickelung des Mesoderms tritt bald in ihm jederseits eine schlitzförmige Höhlung auf, die Anlage des Cöloms, aus dem beim Erwachsenen die Perikardial-, Pleural- und Abdominalhöhle entstehen. Mit dem Auftreten des Cöloms scheidet sich das Mesoderm in ein äußeres Lager, das mit dem Ektoderm in enge Berührung tritt, das somatische Mesoderm, und ein inneres, mit dem Entoderm sich berührendes Lager, das splanchnische Mesoderm.

Embryonale Anhangsorgane. Beide Lager nehmen nicht nur teil an dem Aufbau des Embryos, sondern auch an dem der embryonalen Anhangsorgane, mit denen wir uns nunmehr beschäftigen wollen.

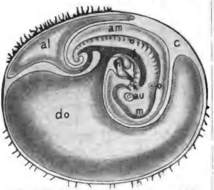


Fig. 41. **Embryo eines Kaninchens.** al Allantois, am Amnion, do Dottersack, c extraembryonales Cölom, schwarz: Chorion mit Zotten, aus denen sich die Placenta entwickelt, u Urwirbel, d Darm, h Herz, k Kiemenspalten, o Gehör, au Auge, m Mittelhirn. Aus R. Hertwig.

Rings um den Embryo erscheint eine vom Ektoderm und dem somatischen Mesoderm gebildete Falte, welche den Embryo umwächst. Indem die Ränder dieser ringförmigen Falte miteinander verschmelzen, bildet sich ein doppelwandiger Sack um den Embryo. Das innere Blatt ist das Amnion, das äußere Blatt die seröse Hülle oder das amniogene Chorion. Der Embryo hat sich von der Keimblase schärfer abgesetzt und seine aus Entoderm und splanchnischem Mesoderm bestehende Darmwand setzt sich in die Wand der Keimblase fort, die dadurch zu einer Art Dottersack wird. Meist sind Dottersack und Chorion voneinander getrennt. Die nunmehr auftretende Allantois ist eine Darmausstülpung, die sich zwischen Dottersack und Chorion begibt, sich letzterem anlegend, und bei den Monodelphiern mit ihm verwachsend. Entweder verwächst die Allantois mit dem Chorion in dessen ganzem Umfange oder nur zum Teil. Ersteres tritt bei den Adeciduata, letzteres bei den Deciduata auf. In die beiden verwachsenen Hüllen wuchern zahlreiche Gefäße ein, welche in zottenartige Auswüchse eintreten, die sich in Vertiefungen der ebenfalls gefäßreichen Uteruswand einsenken. Es kommt dadurch zur Bildung eines Mutterkuchens (Placenta), an dem man einen vom Embryo und einen von dem Uterus der Mutter gelieferten Anteil unterscheiden kann. Die Allantois liefert die Blutgefäße für den embryonalen Anteil der Placenta und wird dadurch zu einem Ernährungs- und Atmungsorgan für den Embryo. Das Chorion, welches mit der Allantois verbunden ist, wird als Allantochorion bezeichnet. Ist diese Verschmelzung im ganzen Umfang des Chorions erfolgt und dieses überall mit Zotten besetzt, so spricht man von einer Placenta diffusa (Schweine, Nilpferde, Unpaarhufer, Kamele, Sirenen, Wale). Wenn sich die Zotten nur an bestimmten Stellen, hier aber kräftig als Büschel entwickeln, so bildet sich eine Placenta polycotyledonia aus; die Kotyledonen, wie die Zottenbüschel genannt werden, stellen gewissermaßen eine größere Anzahl kleiner Placenten dar, zwischen denen das Chorion glatt bleibt (Wiederkäuer). Bei dieser wie der diffusen Form der Placenta werden bei der Geburt die Eihüllen aus der Uteruswand abgelöst, ohne daß letztere dabei verletzt wird (Indeciduata). Bei vielen Säugetieren tritt aber eine innigere Verbindung des embryonalen und des mütterlichen Anteils der Placenta ein, so daß bei der Geburt ein Teil der Schleimhaut der Uteruswand mit abgelöst wird (Deciduata). Doch finden sich zwischen beiden Zuständen Uebergänge. Bei den Formen mit deciduater Placenta nimmt die Zottenbildung nur einen Teil des Chorions ein, und man unterscheidet eine scheibenförmige (Pl. discoidalis) und eine ringförmige Placenta (Pl. zonaria). Eine scheibenförmige findet sich bei Insectivoren, Nagetieren, Affen usw., eine ringförmige bei Carnivoren.

Bei den Beuteltieren erreicht die Allantois das Chorion meist nicht, und eine Placentabildung unterbleibt daher, mit einigen Ausnahmen (Perameles). Die Ernährung des Embryos geschieht hier durch den Dottersackkreislauf. Der stark entwickelte Dotter-

sack kann sich an das Chorion anlegen und so kann es zu einer Art Dottersackplacenta kommen (Dasyurus). Aehnliches findet sich bei einigen Monodelphiern (Pferd, Schuppentier), doch ist das nur ein vorübergehender Zustand. Im allgemeinen spielt bei den Monodelphiern der Dottersack nicht die Rolle wie bei der Beutlern, wenn er auch manchmal bis zur Geburt als Nabelbläschen erhalten bleiben kann. Bei größeren Embryonen bildet sich der Nabelstrang aus, indem die Verbindungsstücke der Allantois und des Dottersackes scheidenartig von dem Amnion umhüllt werden.

4. Systematik und Phylogenie. Die Systematik der rezenten Säugetiere bietet mancherlei Schwierigkeiten, da einzelne isoliert stehende kleine Formengruppen vorhanden sind, welche den Rang eigener Ordnungen beanspruchen, und deren systematische Stellung nur unter Zuhilfenahme der Paläontologie aufgeklärt werden kann. Andererseits geht es nicht mehr an, die Ordnungen der Edentaten, Ungulaten und Cetaceen aufrecht zu erhalten, da sie aus sehr verschiedenartigen Tiergruppen zusammengesetzt sind, und sie sind daher in mehrere einzelne Ordnungen aufgelöst worden. Im wesentlichen habe ich mich in den folgenden systematischen Darlegungen dem Werke von M. Weber „Die Säugetiere", Jena 1904, angeschlossen, auf das ich für eingehendere Studien besonders verweise.

Die Säugetiere werden ganz allgemein in drei Unterklassen eingeteilt, die Monotremata, Marsupialia und Monodelphia, die scharf voneinander geschieden sind.

I. Unterklasse: **Monotremata.**

1. Ordnung: Monotremata (Kloakentiere).

Die erste Unterklasse der Monotremata enthält nur eine Ordnung gleichen Namens. In ihrer Organisation sind sie die niedersten Säugetiere, die sich durch manche primitive Merkmale an die Sauropsiden anschließen. An ihrer Säugetiernatur kann freilich kein Zweifel sein, das beweist schon ihr Haarkleid, ihre Schädelbildung sowie das Vorhandensein von Milchdrüsen zur Ernährung der Jungen, sauropsidenähnlich ist aber die Produktion dotterreicher, 1 bis 1,5 cm im Durchmesser haltender Eier, aus denen die Jungen ausgebrütet werden. Auch der Bau des Urogenitalsystems, speziell die an die Vögel erinnernde Beschaffenheit der weiblichen Geschlechtsorgane deuten auf Zusammenhänge mit niederen Vertebraten hin. Primitiv ist auch die Ausmündung der nach dem tubulösen Typus gebauten Milchdrüsen auf zwei getrennten abdominalen Drüsenfeldern, ohne daß es zur Bildung von Zitzen kommt. Eine nach vorn geöffnete Tasche beim Ameisenigel funktioniert als Brutbeutel, beim Schnabeltier fehlt dieses Organ und ist vielleicht rückgebildet. Den Vertretern beider Familien kommt eine eigentümliche, in einen tarsalen Sporn ausmündende Schenkeldrüse zu. Der Schädel weist noch mancherlei primitive Zustände auf, ist aber im übrigen ein echter Säugetierschädel. Bei Ornithorhynchus fehlt eine eigentliche Paukenhöhle, dafür findet sich eine flache, mit dem Rachen in weiter Verbindung stehende Grube, auch zeigt sich bei ihm im Siebbein statt der zahlreichen Löcher zum Durchtritt der Riechnervenfäden nur eine einzige Oeffnung. Die 3 für die Säugetiere charakteristischen Gehörknöchelchen sind vorhanden. Der knorpelige äußere Gehörgang, der sich in eine sehr kurze, primitive knorpelige Ohrmuschel fortsetzt, ist nicht direkt an dem Annulus tympanicus befestigt, sondern es schiebt sich das dorsale Endstück des Hyoids dazwischen. Der Schneckengang ist nur schwach spiralig gebogen. Die Kiefer der Monotremen sind mit Horn überdeckt und zahnlos. Bei jungen Schnabeltieren liegen aber unter den Hornscheiden in jeder Oberkieferhälfte 2, in jeder Unterkieferhälfte 3 Zähne, welche eine breite vielhöckerige (multituberkulate) Krone haben. Später gehen diese Zähne verloren. Bei Echidna ist das Gebiß viel rudimentärer. Es legt sich eine Zahnleiste zwar an, wird aber bald rückgebildet und nur ein unpaarer Eizahn entwickelt sich an der Spitze des Zwischenkiefers, der zum Durchschneiden der Eischale dient. Das Schulterblatt hat keine oder nur eine angedeutete Spina scapulae. Das Episternum ist ähnlich dem der Reptilien und stark ausgebildet und die Coracoide erreichen das Brustbein. Auch das Becken ist primitiv gebaut, insbesondere treten Scham- und Sitzbein jederseits in der langen Symphyse zusammen. An die Beuteltiere erinnert der Besitz von Beutelknochen, die vom Schambein entspringen. Das Großhirn ist nicht gefurcht und überdeckt das Kleinhirn nur wenig. Ein Balken fehlt. Bei Ornithorhynchus ist das Geruchsorgan infolge der aquatilen Lebensweise reduziert, bei Echidna dagegen mächtig entwickelt. Auf der Zunge entwickeln sich Hornzähnchen, die durch Reiben gegen die Gaumenleisten die Nahrung zerkleinern. Der Magen ist sehr einfach gebaut und schon dadurch von dem aller anderen Säugetiere unterschieden, daß ihm Magendrüsen völlig fehlen. Im Herzen findet sich am rechten Ostium venosum nur eine Atrioventrikularklappe. Im Arteriensystem und mehr noch im Venensystem treten Anklänge an Sauropsidenzustände auf.

Auch die Körpertemperatur erinnert daran. Sie ist niedriger als bei den anderen Säugetieren und beträgt bei Echidna nur 28°. Auch ist sie viel weniger konstant. Primitiv ist der Bau des Kehlkopfes und auch das Urogenitalsystem ist sehr ursprünglich gebaut. Seine Ausmündung gemeinsam mit dem Enddarm hat der Ordnung den Namen „Kloakentiere" verschafft. Die Ureteren münden nicht in die Blase, sondern in den Sinus urogenitalis. Der Bau des Penis weist noch sehr primitive Zustände auf, und die Hoden verbleiben am Orte ihrer Entstehung. Im weiblichen Geschlecht münden die Uteri getrennt in die Kloake und nur der kräftigere linke, traubige Eierstock produziert freiwerdende und dann befruchtete Eier, bei Echidna 1, bei Ornithorhynchus jedesmal 2 vielleicht auch 3 und 4.

Geographische Verbreitung: Australien, Tasmanien und Neu-Guinea. Hierzu gehören die beiden Familien der Ameisenigel (Echidnidae) und Schnabeltiere (Ornithorhynchidae).

II. Unterklasse: **Marsupialia.**

2. Ordnung: Marsupialia (Beuteltiere).

Die Beuteltiere sind lebendig gebärend und stehen in ihrem Bau in mancher Hinsicht zwischen Monotremen und Monodelphiern. In Anpassung an eine sehr verschiedenartige Lebensweise zeigen sie vielfache Aehnlichkeit mit Monodelphiern, so gibt es carnivore, insektivore, herbivore Beutler, Formen mit nagetierähnlichem Gebiß, sowie solche, die eine kletternde, fliegende oder grabende Lebensweise angenommen haben. Keineswegs sind aber die einzelnen Beutlergruppen die Vorfahren der parallel laufenden Formen der Monodelphier, vielmehr sind diese Aehnlichkeiten nur äußerliche Konvergenzerscheinungen. Das Haarkleid ist wohl entwickelt, gelegentlich finden sich Schuppen am Schwanze. Zwischen den Gliedmaßen kann sich bei einigen Formen mit Flugvermögen eine Flughaut ausspannen. Die größtenteils im Beutel liegenden Zitzen sind meist kreisförmig angeordnet, bei manchen Didelphiden liegen sie in je einer lateralen Reihe und nach innen davon erscheint noch eine bis auf fünf steigende unpaare Zahl von Zitzen. Der Beutel öffnet sich nach vorn oder nach hinten oder aber in der Mitte. Durch einen durch den offenen Leistenkanal hindurchtretenden Muskel, der sich vom Musculus transversus abdominis abspaltet und über die Milchdrüsen zieht, kann unter Zuhilfenahme der beiden Beutelknochen die Milch dem Jungen, welches bei der Geburt noch nicht fähig ist zu saugen, in den Magen eingespritzt werden. Das auffälligste Merkmal am Kopfskelett ist der nach innen hakenartig eingebogene Winkel des Unterkiefers (Processus angularis mandibulae), der sonst nur noch bei einigen Nagern auftritt, bei dem Beutler Tarsipes fehlt. Die Zahl der Rippen ist meist dreizehn. Im Schultergürtel ist das Coracoid wie bei den Monodelphiern zu einer Apophyse des Schulterblattes geworden, auf welchem eine Crista scapulae ausgebildet ist. Nur bei den Peramelidae wird die Clavicula rudimentär. Das Gehirn steht noch auf einer niedrigen Stufe der Entwickelung. Die kleinen Großhirnhemisphären sind fast gänzlich furchenlos und ein Corpus callosum fehlt. Das Gebiß zeichnet sich durch die ursprüngliche große Zahl von Incisiven aus, und läßt sich von der Formel $J\frac{5}{5}\ C\frac{1}{1}\ P\frac{4}{4}\ M\frac{4}{4}$ ableiten. Durch Anpassung an sehr verschiedene Lebensweise ist es nach den verschiedensten Richtungen hin differenziert. Ganz charakteristisch für das Beutlergebiß ist der fast aufgehobene Zahnwechsel, indem nur ein Zahn, der vierte Prämolar einen Nachfolger hat. Das funktionierende Beutlergebiß gehört der ersten oder Milchdentition an. Labialwärts davon auftretende Zahnkeime sind der prälaktealen Dentition zugehörig, während nach innen davon auftretende Anlagen der Ersatzzahnreihe angehören, die nach der einen Ansicht (Kükenthal) unterdrückt ist, nach der anderen (Leche) die Anfänge der permanenten Dentition darstellt, die erst bei den Monodelphia sich völlig ausbildet. Jedenfalls stimmt die Mehrzahl der Forscher aber der Ansicht zu, daß das funktionierende Beutlergebiß der Milchdentition angehört und eine andere Auffassung, nach welcher die prälaktealen Anlagen das rudimentär gewordene Milchgebiß darstellen, hat wenig Anhänger gefunden. Das Persistieren des Milchgebisses findet seine Erklärung in der eigentümlichen Brutpflege, insbesondere der Bildung eines zeitweiligen Saugmundes, wodurch die Ausbildung des Milchgebisses sich verzögert.

Da die Jungen sehr frühzeitig geboren werden — das Junge des Riesenkänguruh mißt bei der Geburt nur etwa 4 cm — sind noch mancherlei embryonale Charaktere vorhanden, so funktioniert noch anfänglich die Urniere, die dann bald durch die bleibenden Nieren ersetzt wird. Die Ureteren münden bei den Beutlern in die Blase ein, nicht wie bei den Monotremen in den Sinus urogenitalis. Im männlichen Geschlecht findet ein Durchwandern der Hoden durch den Leistenkanal statt, und eine Rückwanderung tritt nicht ein. Die Hoden liegen vor dem Penis in einem meist vortretenden Hodensack. Der Penis ist in seine Scheide zurückziehbar und ist an seinem vorderen

Ende häufig zweigeteilt, entsprechend der paarig auftretenden Vagina. Im weiblichen Geschlecht bleiben die Müllerschen Gänge völlig getrennt (Didelphiden) oder es verwachsen die Vaginen teilweise in der Medianlinie. Hier kann dann ein Blindsack entstehen, der zum Sinus urogenitalis durchbrechen und eine dritte unpaare Vagina bilden kann. Uteri und Ovidukte sind stets völlig voneinander getrennt. Durch unvollständige Ausbildung des Dammes kann es beim weiblichen Geschlecht zu einer allerdings flachen Kloake kommen.

Während man früher die Beuteltiere scharf von den Placentaliern schied, indem man sie als Aplacentalier mit den Monotremen zusammenstellte, hat man neuerdings Fälle entdeckt (Perameles), in denen es zur Bildung einer echten Placenta kommt, an der die Allantois beteiligt ist. Vorwiegend tritt aber nur eine Dottersackplacenta in Funktion, wobei ernährende Sekrete der Uterusdrüsen in die Gefäße des ansehnlichen Dottersackes aufgenommen werden. Das sehr unvollkommen geborene Junge zeigt vielfach Larvenorgane, wie den Saugmund, einen weit in den Nasenraum hineinragenden Kehlkopf, damit die Atmung durch die gleichzeitige Aufnahme der mütterlichen Milch nicht unterbrochen wird, stark entwickelte, mit großen Krallen versehene Vorderextremitäten, um sich an dem mütterlichen Körper festzuhalten u. a. m.

Geographische Verbreitung: Die Hauptentwickelung der Beutler ist in Australien vor sich gegangen, von wo einzelne Vertreter nach benachbarten Inseln gelangt sind. Ferner finden sich lebende Beuteltiere noch in Südamerika, der Familie der Didelphiden angehörig, von denen einige Vertreter bis Nordamerika vorgedrungen sind, und neuerdings hat man in Ecuador einen lebenden Vertreter (Caenolestes) der sich den Diprotodontiern anschließenden Familie der Epanorthidae entdeckt.

Die Beuteltiere werden meist in die zwei Unterordnungen der fleischfressenden und der pflanzenfressenden Beuteltiere, Polyprotodontia und Diprotodontia eingeteilt, zwischen denen aber nach der Entdeckung des rezenten, einen Uebergang bildenden Caenolestes noch eine dritte Unterordnung, die der Paucituberculata, einzuschieben ist.

1. Unterordnung: Polyprotodontia. Fleisch- und Insektenfresser mit dafür angepaßtem Gebiß, bis zu 5 Schneidezähnen, starken Eckzähnen und spitzhöckerigen Backenzähnen. Bald mehr carnivoren-, bald mehr insektivorenähnlich. Mit den Familien der Didelphidae, Dasyuridae, Notoryctidae und Peramelidae.

2. Unterordnung: Paucituberculata. Der untere innere Schneidezahn ist groß und nach vorn gerichtet, die Backenzähne sind vier- bis fünfspitzig: Caenolestes.

3. Unterordnung: Diprotodontia. Pflanzenfresser. Große, nach vorn gerichtete Schneidezähne, unten nur je einer, im Oberkiefer können neben den großen inneren noch 1 bis 2 kleinere seitliche Schneidezähne vorhanden sein. Eckzähne klein oder völlig rückgebildet. Backenzähne vierhöckerig oder mit stumpfen Querjochen versehen. Heimat: Australien. Mit den Familien der Phascolarctidae und Phalangeridae, letztere auch die Unterfamilie der Kängurubs (Macropodinae) enthaltend.

III. Unterklasse: **Monodelphia.**

Diese auch als Placentalia bezeichnete Unterklasse enthält alle höheren Säugetiere, ohne Kloake, mit unpaarer Scheide und ungespaltenem Penis, ohne Beutel und Beutelknochen. Die Entwickelung verläuft im mütterlichen Uterus und der Embryo wird durch ein besonderes Organ, die Placenta, mit mütterlichem Blut ernährt. Im Skelett ist ebenfalls eine höhere Entwickelung eingetreten, ein eigenes Foramen opticum für den Sehnerven ist im Gegensatz zu den Beuteltieren fast stets vorhanden, ebenso ein harter Gaumen ohne Lücken. Wenn ein Unterkieferwinkel ausgebildet ist, so ist er nicht eingebogen wie bei den Beuteltieren. Die Carotis interna tritt durch das Foramen lacerum anterius in den Schädel ein. Das Gebiß wird, wenigstens ursprünglich, gewechselt. Die Zahnformel der primitivsten Monodelphier ist $J\frac{3}{4}\ C\frac{1}{1}\ P\frac{4}{4}\ M\frac{3}{3}$, zusammen also 44 Zähne. Wie bei den Marsupialiern, so ist auch bei den Monodelphiern das Coracoid zu einer Apophyse der mit einer Crista scapulae versehenen Scapula, dem Processus coracoideus geworden. Im Gehirn tritt stets ein die Großhirnhemisphären verbindendes Corpus callosum auf.

3. Ordnung: Insectivora (Insektenfresser).

Die Insektenfresser sind in vieler Hinsicht die ursprünglichsten Monodelphier, haben eine meist nächtliche Lebensweise und ihre Nahrung besteht vorwiegend aus Insekten. Viele leben auch unterirdisch oder grabend, einzelne bewohnen Bäume oder haben sich dem Leben im Wasser angepaßt.

Die Haut ist besonders am Schwanze außer mit Haaren auch mit Schuppen bedeckt; bei manchen Formen (Igel, Centetes) finden sich auch Stachelbildungen. Gelegentlich können wohlentwickelte Hautdrüsen auftreten, die ein stark riechendes Sekret absondern. Die Schnauze ist meist rüsselartig verlängert. Der Schädel zeigt einen primitiven Bau, die Hirnhöhle ist sehr klein. Die Extremitäten sind meist fünfzehig und mit Krallen versehen. Die Schlüsselbeine

sind fast stets vorhanden. Das Gebiß besteht aus heterodonten Wurzelzähnen und ist diphyodont. Das Milchgebiß ist verschieden entwickelt. Bei Centetes persistiert es so lange, daß es mit den Molaren zusammen funktioniert, beim Igel ist der Zahnwechsel auf dem Wege der Reduktion, bei den Spitzmäusen erfolgt der Zahnwechsel sehr frühzeitig. Das Gebiß der Insektivoren enthält ursprünglich 44 Zähne nach der Formel $J\frac{3}{3}\ C\frac{1}{1}\ P\frac{4}{4}\ M\frac{3}{3}$ und bei Centetes kann sogar noch ein vierter Molar jederseits auftreten. Andere Insektivoren zeigen eine verschieden weit gehende Reduktion der Zahnzahl. Die hinteren Backenzähne sind spitzhöckerig und die Höcker können durch Leisten verbunden sein. Jene Insektenfresser, welche einen Winterschlaf halten, besitzen eine oft mächtig entwickelte sogenannte Winterschlafdrüse, die aber keine Drüse ist, sondern nur aus Fettgewebe besteht. Die meisten Formen sind Sohlengänger. Die Hoden behalten bei einigen Formen ihre ursprüngliche Lage in der Leibeshöhle, bei anderen tritt aber ein Descensus testiculorum ein. Der Uterus ist stets zweihörnig, oft nahezu zweigeteilt, mündet aber stets nur mit einer Ausmündung in die Vagina. Die Placenta ist scheibenförmig und deciduat. Hierher gehören die Familien der Tupajidae, Macroscelididae, Talpidae, Soricidae, Erinaceidae, Potamogalidae, Centetidae, Chrysochloridae.

Verbreitung. Insektenfresser kommen fast nur in der Arctogaea vor, und ihre Familien haben meist eine beschränkte Verbreitung. Interessant ist, daß die Centetidae Madagaskar bewohnen, der ihnen sehr nahestehende Solenodon dagegen Kuba und Haiti. Am ausgedehntesten ist die Verbreitung der Soricidae.

4. Ordnung: Galeopithecidae.

Mit den Insektivoren nahe verwandt, mit Flughaut ausgestattet, wahrscheinlich von Tupaia-ähnlichen Formen abstammend. Die Flughaut hüllt die Extremitäten bis zu den Krallen sowie den Schwanz ein, und befähigt das Tier auf weite Entfernung hin herabzuschweben. Die Flughaut ist fast durchweg behaart. Ein Ersatzgebiß tritt erst spät auf. Die Schneidezähne stehen im Unterkiefer fast horizontal und sind kammförmig tief eingeschnitten. Die Gebißformel ist $J\frac{2}{2}\ C\frac{0}{1}\ P\frac{3}{3}\ M\frac{3}{3}$. Hand und Fuß sind fünfstrahlig. Die Orbita ist durch einen fast vollständigen Orbitalring abgegrenzt, auffällig kurz sind die Großhirnhemisphären, die die Vierhügelregion unbedeckt lassen. Dagegen ist das Riechhirn stark entwickelt. Der Uterus ist ein Uterus duplex. Die Placenta ist scheibenförmig. Galeopithecus mit zwei Arten.

Verbreitung: Hinterindien, westlicher malaiischer Archipel und Philippinen.

5. Ordnung: Chiroptera.

Fliegende Säugetiere, von baumkletternden primitiven Insektivoren abzuleiten. Dämmerungs- oder Nachttiere, insektenoder früchtefressend. Die elastische nackte oder nur dünn behaarte Flughaut umfaßt völlig die Vorderextremität mit Ausnahme des freibleibenden Daumens und setzt sich an die Fußwurzel der Hinterextremität an. Die Finger der Vorderextremität sind enorm verlängert, mit Ausnahme des mit einer Kralle versehenen Daumens. Mit dem Flugvermögen hängt auch die Entwickelung eines Knochenkammes auf dem Brustbein, ähnlich wie die Carina der Vögel, zusammen, ebenso die kräftige Entwickelung der Schlüsselbeine. Vielfach treten Hautdrüsen zu größeren Komplexen zusammen, die vorwiegend im männlichen Geschlecht auftreten und stark riechende Sekrete absondern. Die Haut enthält zahlreiche Tasthaare, besonders auf der Flughaut und den oft sehr großen Ohren. Bei insektenfressenden Formen können sich eigentümliche, oft blattartige Nasenaufsätze entwickeln. Das Gebiß ist ursprünglich nach der Formel $J\frac{2}{3}\ C\frac{1}{1}\ P\frac{3}{3}\ M\frac{3}{3}$ gebaut, doch treten vielfach Rückbildungen von einzelnen Zähnen ein. Der heterodonten permanenten Dentition geht eine mehr homodonte Milchdentition voraus, die frühzeitig resorbiert wird. Der Magen ist einfach oder mit einem Blindsack versehen. Der Uterus weist sehr verschiedene Formen auf. Die Hoden können zeitweilig wieder in die Bauchhöhle zurückgezogen werden. Der Penis pendulus hat ein Os penis aufzuweisen. Sehr eigentümlich ist die Befruchtung, die in unserem Klima in den Herbst fällt. Das Sperma gerinnt im Uterus zu einer Masse, die den Winter über darin aufbewahrt wird, während dessen die Tiere in Winterschlaf verfallen. Erst im Frühjahr entwickeln sich die Eier und die Befruchtung findet statt. Im Beginn des Juni werden die Jungen geboren und mit der Milch der meist in der Zweizahl auftretenden axillar oder auch rein bruständig gelegenen Zitzen gesäugt. Die Placenta ist scheibenförmig und deciduat.

1. Unterordnung: Megachiroptera. Vorwiegend fruchtfressend, mit stumpfhöckerigen Backenzähnen. Erster und zweiter Finger mit Kralle. Hierhin gehören die Familien der Pteropodidae und Rhinolophidae.

2. Unterordnung: Microchiroptera. Meist insektenfressend. Mit scharfspitzigen Zähnen.

Nur der erste Finger mit Kralle versehen. Hierhin gehören die Familien der Phyllosomatidae, Emballonuridae, Vespertilionidae.

6. Ordnung: Nomarthra.

Früher wurden Gürteltiere, Schuppentiere, Erdferkel, Faultiere und Ameisenbären zu einer Ordnung Edentata vereinigt, weil ihr Gebiß in Reduktion begriffen ist und völlig fehlen kann. Neuerdings trennt man sie aber in 2 oder auch 3 nicht näher blutsverwandte Ordnungen. Zu den Nomarthra werden die Schuppentiere und Erdferkel gezählt, letztere neuerdings auch als besondere Ordnung Tubulidentata aufgeführt.

Der Name Nomarthra rührt davon her, daß die Artikulation der letzten Brustwirbel und der Lendenwirbel normal ist, während die Xenarthra akzessorische Gelenkfortsätze besitzen.

1. Unterordnung: Effodientia. Körper mit großen Hornschuppen bedeckt. Haarkleid reduziert. Milchdrüsen brustständig. Kräftige Scharrkrallen. Das Nasoturbinale enorm lang, das Maxilloturbinale überragend. Das Xiphisternum ist vorn verlängert, in eine breite Schaufel oder 2 lange Knorpelstäbe endigend. Das steht in Beziehung zur Entwickelung einer langen wurmförmigen Zunge, die weit vorstreckbar ist. Zähne fehlen völlig. Der Fuß ist plantigrad. Die Tiere sind meist gute Kletterer und vermögen sich einzurollen. Der Magen ist einfach und teilweise mit Hornzähnen versehen zum Zermahlen der aus Ameisen und Termiten bestehenden Nahrung. Der Uterus ist zweihörnig. Die Placenta ist diffus und adeciduat. Der Dottersack bleibt bis zur Geburt bestehen. Verbreitung: Afrika und Asien. Einzige Familie: Manidae, Schuppentiere.

2. Unterordnung: Tubulidentata. Körper mit Haarkleid bedeckt, das in Rückbildung begriffen ist. Schädel sehr lang gestreckt. Das Lacrymale ist sehr groß, auch ist ein gesondertes großes Interparietale vorhanden. Enorm entwickelt ist das periphere Geruchsorgan mit 11 medialen Riechwülsten. Die Zunge ist weit vorstreckbar, lang und schmal. Das Gebiß ist heterodont und diphyodont. Die Zähne weisen eine eigentümliche Struktur auf, indem ihr Dentin aus zahlreichen parallelen sechsseitigen Prismen zusammengesetzt ist, in deren Mitte sich jedesmal ein Teil der Zahnpulpa befindet, die sich also in derartige Einzelpapillen aufgelöst hat. Die Zähne sind säulenförmig, wurzellos und ohne Schmelz. Das Milchgebiß ist heterodont, bricht aber nicht mehr durch die Kieferschleimhaut. Vom permanenten Gebiß fallen die drei vorderen Zähne bald aus. Der Magen besitzt ein blindsackartiges Divertikel. Der Uterus ist ein Uterus duplex, die Placenta ist gürtelförmig. Es wird nur ein Junges geboren. Die Zitzen liegen abdominal und inguinal. Die Nahrung besteht vorzugsweise aus Termiten. Verbreitung: Aethiopische Region. Nur eine Gattung Orycteropus mit ein paar Arten.

7. Ordnung: Xenarthra.

Neben der gewöhnlichen Artikulation der letzten Brustwirbel und der Lendenwirbel tritt eine anomale durch akzessorische Gelenkfortsätze auf. Die Haut ist mit Haaren bedeckt oder beschuppt und außer den Hornschuppen treten entsprechende Verknöcherungen der Lederhaut auf, die zu größeren Knochenplatten verschmelzen können. In der Halswirbelsäule können bis 9 Halswirbel (Bradypus) auftreten, andererseits kann deren Zahl auf 6 sinken (Choloepus Hoffmanni). Der Fuß ist stets plantigrad und meist fünfzehig. Die Zehen sind stets bekrallt. Das Gebiß ist ursprünglich diphyodont. Das Milchgebiß wird aber meist unterdrückt und tritt nur noch embryonal auf. Die Zähne sind immerwachsend mit einheitlicher Pulpa und offenbleibender Pulpahöhle. Das Schmelzorgan ist zwar vorhanden, scheidet aber keinen Schmelz ab. Bei den Ameisenbären ist das Gebiß völlig verschwunden und die Zunge ist bei ihnen wurmförmig verlängert, bei den Gürteltieren dagegen kürzer. Beide Gruppen nähren sich hauptsächlich von Insekten und ihr Magen ist einfach gebaut, dagegen haben die von Blättern lebenden Faultiere einen sehr komplizierten, aus mehreren Abteilungen bestehenden Magen. Primitiv gebaut ist der weibliche Geschlechtsapparat. Die Müllerschen Gänge sind nur in ihrem mittleren Teile zu einem Uterus simplex verschmolzen, in ihrem kaudalen Teile aber nicht zu eigentlichen Vaginen differenziert. Die Placenta ist scheibenförmig und deciduat.

Verbreitung: Neogaea. Hierher gehören die Familien der Faultiere (Bradypodidae), Ameisenbären (Myrmecophagidae) und Gürteltiere (Dasypodidae).

8. Ordnung: Rodentia, Nagetiere.

Aeußerst artenreiche, über die ganze Erde verbreitete Ordnung, mit manchen primitiven morphologischen Merkmalen. Die Haut zeigt häufig noch Reste eines Schuppenkleides, besonders am Schwanze und den Gliedmaßen. Bei wasserlebenden Nagern können sich Schwimmhäute zwischen den Zehen ausbilden, bei baumbewohnenden als Fallschirm wirkende Flughäute. Zitzen brustständig oder bauchständig oder beides zusammen, gelegentlich auch auf dem Oberschenkel oder axillar. Die Zahl der Zitzen steigt bis 18. Die Zehen sind mit gebogenen Krallen bewaffnet, die zu Scharrkrallen oder hufähnlich werden können. Das Unterkiefergelenk gestattet eine ausgiebige Gleitbewegung von vorn nach hinten. Die beiden Unterkieferäste sind beweglich miteinander verbunden. Die Nagefunktion hat auch einzelne Teile des Schädels beeinflußt. Das

Foramen infraorbitale kann zu einem umfangreichen Canalis infraorbitalis werden, aus dem eine Portion des Musculus masseter entspringt. Entweder findet sich nur ein Schneidezahn in jeder Kieferhälfte (Simplicidentaten) oder es tritt hinter ihm im Zwischenkiefer noch ein kleinerer auf (Duplicidentaten). Der große Nagezahn ist dem J2 homolog, wurzellos und immerwachsend; da die Vorderseite dieses Zahnes ausschließlich (Simplicidentaten) oder doch vorwiegend (Duplicidentaten) mit Schmelz bedeckt ist, findet auf ihr geringere Abnutzung durch den Nageprozeß statt als auf der Hinterseite, und daher werden die Nagezähne meißelförmig. Zwischen Nagezahn und erstem Backenzahn findet sich eine weite Lücke (Diastema). Das Milchgebiß ist in verschieden hohem Grade rudimentär geworden. Das Gebiß schwankt von $\frac{2023}{1022}$ bis $\frac{1002}{1002}$. Die Backenzähne zeigen in Uebereinstimmung mit ihrer Funktion, pflanzliche Nahrung zu zerreiben, transversale Schmelzfaltung. Entweder wird diese Zahnform von einem trigonodonten Zahntypus abgeleitet (Schlosser) oder von einem polybunodonten (Forsyth Major). Die Oberlippe ist häufig gespalten. Die Wangenhaut ist oft auch innen behaart, auch kann es zur Ausbildung von Backentaschen kommen. Der Magen ist einfach und nur bei den Muriden äußerlich in zwei Teile abgeschnürt. Die Hoden können zeitweilig in die Bauchhöhle zurückverlagert werden. Der Penis hat häufig einen Penisknochen. Der Uterus ist ein Uterus duplex. Die Placenta ist scheibenförmig und deciduat.

1. Unterordnung: Duplicidentata.

Hinter den Nagezähnen liegt noch ein weiteres Paar Incisiven (J3), die viel kleiner sind. Der Unterkiefer kann in der breiten Gelenkgrube seitlich verschoben werden. Die beiden Unterkieferäste sind fest verbunden. Der Gaumen weist zahlreiche Gaumenleisten auf.

Hierhin gehören die Familien der Ochotonidae und Leporidae (Hasen).

2. Unterordnung: Simplicidentata.

Mit nur einem nur an der Vorderseite mit Schmelz bedeckten Nagezahn in jeder Kieferhälfte. Unterkieferhälften meist locker verbunden. Der Condylus des Unterkiefers ist langgestreckt, ein großer Processus angularis ist vorhanden, dessen vordere Ecke nach einwärts gebogen sein kann. Gaumenleisten nur vereinzelt, zuweilen treten Backentaschen auf.

Hierhin gehören die Familien der Haplodontidae, Sciuridae, Castoridae, Geomyidae, Anomaluridae, Myoxidae, Dipodidae, Muridae, Spalacidae, Nesomyidae, Bathyergoidae, Hystricoidae.

9. Ordnung: Carnivora.

Terrestrische Raubtiere, mit scharfkralligen Extremitäten und schneidendem Gebiß. Bei den Feliden sind die Krallen zurückziehbar. Der Schädel zeigt der starken Entwickelung der Kaumuskulatur entsprechende Umformungen. Das Schlüsselbein ist rudimentär oder fehlt völlig. Sohlen-, Halbsohlen- oder Zehengänger. Das Gehirn ist hoch entwickelt, ebenso das Geruchsorgan. Das Leuchten des Augenhintergrundes, besonders bei den Feliden, wird von dem Tapetum lucidum cellulosum bewirkt. Das Gebiß ist diphyodont und heterodont, und die Zähne sind stets mit Wurzeln versehen. Fast stets sind 3 Incisiven jederseits vorhanden. Der Eckzahn ist stark entwickelt. Die Backenzähne sind meist scharfspitzig mit schneidenden Kanten ihrer Höcker. Der letzte Prämolar des Oberkiefers und der erste Molar des Unterkiefers werden zu Reißzähnen mit schneidenden Zacken. Diesen großen Reißzähnen gegenüber treten die anderen Backenzähne an Ausbildung zurück. Das Milchgebiß mit der Formel $Jd\frac{3}{3}\ Cd\frac{1}{1}\ Pd\frac{3}{3}$ ist meist längere Zeit im Gebrauch, bevor es gewechselt wird. Die Zunge ist, besonders bei Feliden, mit harten Hornpapillen besetzt. Der Magen ist stets einfach und in seiner Längsachse transversal gelagert. Der Blinddarm ist kurz oder rudimentär oder fehlend. Die Hoden liegen extraabdominal. Ein Penisknochen ist meist vorhanden. Der Uterus ist zweihörnig, die Placenta ringförmig und deciduat. Die Milchdrüsen liegen stets abdominal.

Verbreitung: Die Carnivoren sind nahezu kosmopolitisch. Nur Australien fehlen sie bis auf den Dingo, und auch die neotropische Region hat nur wenige Vertreter.

1. Unterordnung: Herpestoidea.

Mit annähernd ringförmigem Tympanicum und meist kurzem knöchernen äußeren Gehörgang. Das Maxilloturbinale ist klein und nicht verästelt, sondern nur doppelt gewunden. Penisknochen klein oder fehlend. Mit den Familien der Felidae, Viverridae und Hyaenidae.

2. Unterordnung: Arctoidea.

Mit schüsselförmigem Tympanicum und langem knöchernen äußeren Gehörgang. Das Maxilloturbinale ist groß und verästelt. Penisknochen stark entwickelt. Mit den Familien der Canidae, Ursidae, Procyonidae, Mustelidae.

10. Ordnung: Pinnipedia.

Dem Wasserleben angepaßte Raubtiere. Der Körper ist spindelförmig. Haare kurz und dicht, teilweise auch rückgebildet (Walroß). Die Extremitäten sind zu breiten Flossen umgebildet. 5 Finger, 5 Zehen, durch Schwimmhaut verbunden. Krallen besonders an der Hinterextremität rudimentär werdend. Schlüsselbeine fehlen. Gehirn mit breiten Großhirnhemisphären. Die

äußeren Nasenöffnungen werden beim Tauchen geschlossen. Auge mit kugeliger Linse und flacher Hornhaut. Das äußere Ohr in verschieden hohem Grade rudimentär. Gebiß mehr zum Ergreifen der Beute eingerichtet, $J\frac{3}{2}\ C\frac{1}{1}\ P+M\frac{6}{6}$ mit Reduktion der Zahnzahl. Die Backenzähne sind in ihrer Gestalt vereinfacht und einander ähnlich. Ein Reißzahn wird nicht ausgebildet. Das Milchgebiß wird oft schon vor der Geburt resorbiert. Der Magen ist einfach, mit seiner Längsachse in der Längsachse des Tieres orientiert. Der Blinddarm ist kurz. Ein Penisknochen ist vorhanden. Der Uterus ist zweihörnig, die Placenta gürtelförmig und deciduat.

Mit den Familien der Otariidae Trichechidae und Phocidae.

Cetacea (Wale).

Die Wale bilden eine aus 2 Ordnungen bestehende Säugetiergruppe, die durch Anpassung an die gleiche Lebensweise in ihrem Körperbau viele Aehnlichkeiten miteinander gewonnen haben. So ist der Körper fischähnlich gestaltet und der Kopf geht ohne Andeutung eines Halses in den Rumpf über, der sich allmählich zu dem Schwanze verjüngt. Kopf, Rumpf und Schwanz liegen in einer geraden Linie. Die Körperoberfläche ist vollkommen glatt, und ein Haarkleid ist geschwunden bis auf wenige nach dem Typus der Sinneshaare gebaute Haare am Kopf, insbesondere der Oberlippe, die bei manchen Arten auch völlig fehlen können. Die Epidermis ist relativ dick und von hohen Lederhautpapillen durchzogen, die Lederhaut selbst ist meist sehr dünn und geht allmählich in eine darunter liegende, sehr dicke Speckschicht über. Die Vorderextremitäten sind in Flossen umgewandelt, die als Gleichgewichtsorgane und als Steuer dienen. Die Hinterextremitäten sind geschwunden, werden aber embryonal noch angelegt (s. Fig. 42). Die Schwanzflosse ist horizontal gestellt und entsteht aus zwei seitlichen Hautfalten, ohne Skelettelemente zu enthalten. Auch die Rückenflosse, die bei manchen Formen fehlen kann und die als Kiel fungiert, hat sich aus einer Hautfalte herausgebildet. Das Skelett ist ausgezeichnet durch seinen spongiösen Bau, und die Knochen sind stark fetthaltig. Die Schädelkapsel ist stark verbreitert und in der Längsachse verkürzt, so daß die Parietalia nicht mehr in der Mitte zusammenstoßen. Dagegen sind die Gesichtsknochen stark verlängert, die Nasenöffnungen sind scheitelwärts verschoben und die Knochen ihrer Umgebung sowie auch die Schnauzenpartie sind besonders bei den Zahnwalen stark asymmetrisch. Stets tritt eine Verschiebung nach links ein, die auf die eigentümliche, eine drehende Komponente enthaltende Schwanzflossenbewegung zurückzuführen ist. Die 7 Halswirbel sind stark verkürzt, und Verschmelzungen treten von vorn nach hinten fortschreitend ein. Die Wirbel sind durch dicke Intervertebralscheiben miteinander verbunden, haben aber keine andere

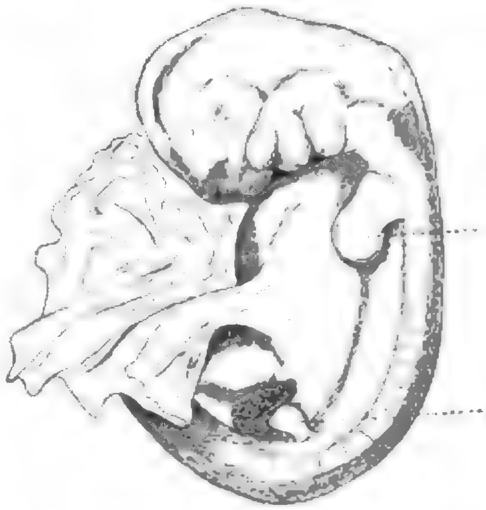


Fig. 42. Embryo von Phocaena Dallii von 11 mm direkter Länge. 1 Anlage der Vorderextremitäten, 2 Anlage der Hinterextremitäten. Original.

gelenkige Verbindung miteinander. Eine Clavicula fehlt. Das Skelett der Vorderextremität besteht in seinem proximalen Teile aus sehr kurzen Knochen, die in den Körper zurückgezogen sind, dagegen ist die Hand stark entwickelt und die Finger zerfallen in eine größere Anzahl Phalangen (Hyperphalangie). Bis zu ihrer äußersten Spitze sind sie in eine Schwimmhaut eingehüllt. Vom Becken sind nur noch Rudimente vorhanden, und zwar vom Ischium, zu dem bei den Bartenwalen auch noch Reste von Femur und Tibia treten können. Das Gehirn ist sehr breit und äußerst windungsreich. Der Riechnerv ist nur schwach entwickelt oder gänzlich geschwunden, und dementsprechend ist auch das Geruchsorgan rudimentär. Die Nase dient nur noch der Atemfunktion. In den unteren gemeinsamen Abschnitt der Nasengänge tritt der Kehlkopf weit hinein, die Rachenhöhle durchquerend. Das relativ kleine Auge ist dem Sehen im Wasser angepaßt und hat eine abgeflachte Cornea und kugelförmige Linse. Gegen den Druck beim Tauchen ist es durch eine enorm dicke und feste Sklera geschützt. Das Gehörorgan ist wohl entwickelt und in eigentümlicher Weise dem Hören im Wasser angepaßt (s. S. 659). Der äußere Gehörgang hat kein freies Lumen mehr; Rudimente einer äußeren Ohrmuschel liegen unter der Haut. Der Magen ist aus mehreren Abteilungen zusammengesetzt, die hintereinander liegen. Die sehr elastischen Lungen erstrecken sich weit

nach hinten, da das Zwerchfell schräg dorsalwärts nach hinten verläuft. Beim Ausatmen wird die Atemluft mit voller Kraft durch die engen Nasenlöcher nach außen gepreßt, und der sich kondensierende Atemstrahl hat die irrige Vorstellung vom Wasserspritzen der Wale hervorgerufen. Die Nieren sind stark gelappt, die Hoden verbleiben in der Bauchhöhle, waren aber ursprünglich extraabdominal gelagert. Der Penis ist in eine Tasche zurückziehbar, ein Os penis fehlt stets. Der Uterus ist zweihörnig, die Placenta diffus und adeciduat. Die Trächtigkeit dauert 10 Monate bis über 1 Jahr. Die Zitzen liegen paarig zu beiden Seiten der Vulva. Die Milch wird dem Jungen durch einen Muskel ins Maul gespritzt.

Ueber die geographische Verbreitung s. S. 694.

11. Ordnung: Odontoceti.

Die meisten Zahnwale haben ein funktionierendes homodontes und vielzahniges Gebiß, das von der Milchdentition geliefert wird. Die Ersatzzähne legen sich an, brechen aber nicht durch. Die Homodontie ist eine sekundäre Erscheinung und das Gebiß war ursprünglich heterodont. Die Vielzahnigkeit entsteht durch neu auftretende Zähne am Hinterende der Zahnleiste. Vielfach tritt Reduktion des Gebisses ein, bis zu fast völligem Schwunde. Die äußere Nasenöffnung ist unpaar; die Nasengänge haben Nebenhöhlen und sind fundamental verschieden von denen der Bartenwale, ebenso die Art ihrer Verschlüsse. Die Nasalia liegen hinter der äußeren Nasenöffnung. Die Ethmoturbinalia sind rudimentär. Ein Blinddarm fehlt.

Hierher gehören die Familien der Physeteridae, Ziphiidae, Iniidae, Delphinidae, Delphinapteridae und Platanistidae.

12. Ordnung: Mystacoceti.

Die Bartenwale haben embryonal Zahnanlagen, die aber nicht durchbrechen, sondern lange vor der Geburt wieder resorbiert werden. Am knöchernen Gaumen stehen in zwei Reihen transversal angeordnete Hornplatten, die Barten, deren innerer Rand aufgefasert ist, und die als Filter für die vorwiegend aus Plankton bestehende Nahrung dienen. Riesig große Zunge. Die Nasenkanäle verlaufen schräg nach vorn und münden in zwei getrennten Längsschlitzen aus. Nebenhöhlen fehlen. Ethmoturbinalia sind vorhanden. Die gut ausgebildeten Nasalia überdecken den Hinterrand der beiden knöchernen Nasenöffnungen. Blinddarm vorhanden.

Hierher gehören die Familien der Glattwale (Balaenidae) und Furchenwale (Balaenopteridae).

Die frühere Ordnung der Ungulata ist heute in mehrere selbständige Ordnungen aufgelöst worden, von denen die der Perissodactylen, Artiodactylen, Hyracoidea und Proboscidea rezente Vertreter enthalten.

13. Ordnung: Perissodactyla.

Die Perissodactylen sind pflanzenfressende Huftiere, deren Körpergewicht vorwiegend oder ausschließlich auf dem dritten Finger ruht. Die Haut ist bei den Tapiren und Nashörnern dick und mit spärlichen Haaren bedeckt, weshalb Cuvier diese Formen zusammen mit den Schweinen, Elefanten und Klippschliefern zu einer Ordnung der Dickhäuter (Pachydermata) vereinigte. Bei den Pferden ist nur der Mittelfinger erhalten, während die anderen rudimentär geworden sind. Der Nagel dieses Fingers ist zum „Huf" geworden. Am Schädel ist besonders beim Pferd ein starkes Ueberwiegen des Gesichtsteiles über den cerebralen Teil zu bemerken. Die Nasalia sind hinten verbreitert. Die Unterkieferäste sind miteinander verschmolzen. Der Oberschenkel hat am Außenrande einen Fortsatz (Trochanter tertius). Das Gebiß war ursprünglich nach der Formel $J\frac{3}{3}\ C\frac{1}{1}\ P\frac{4}{4}\ M\frac{3}{3}$ gebaut. Die Backenzähne waren bunodont. Daraus haben sich dann die lophodonten Zähne mit zunächst 2 Querjochen (Tapire) ausgebildet. Die Backenzähne sind von quadratischer Form und Prämolaren und Molaren sind ungefähr gleich groß. Der Magen ist einfach, der Darm sehr lang, der Blinddarm groß und weit. Die Hoden liegen inguinal, beim Pferd in einem echten Skrotum. Der Uterus ist zweihörnig, die Placenta diffus. Zwei inguinale Zitzen.

Hierher gehören die Familien der Tapire (Tapiridae), Nashörner (Rhinocerotidae) und Pferde (Equidae).

14. Ordnung: Artiodactyla.

Die Extremitätenachse fällt zwischen die dritte und die vierte Zehe. Die zweite und fünfte Zehe sind kleiner, sitzen etwas hinter den anderen und können fehlen. Ein Trochanter tertius fehlt dem Oberschenkel. Das Haarkleid ist bei der Gruppe der Wiederkäuer dicht, oft wollig, bei den Nonruminantia sind die Haare mehr vereinzelt und borstig. Der Schädel weist nicht oder nur wenig verbreiterte Nasalia auf. Der Gesichtsschädel ist gegenüber dem cerebralen Schädelteil ventralwärts mehr oder minder abgeknickt. Die Stirnbeine werden sehr groß und reichen weit nach hinten. Die Scheitelbeine dagegen werden schmaler. Pneumatische Hohlräume treten in den Schädelknochen in großer Ausdehnung auf. Das Gebiß hat sich in ursprünglicherer

Form noch bei der Gattung Sus erhalten, mit der Zahnformel $\frac{3143}{3143}$. Durch Ausfall von Zähnen, Ausbildung von Zwischenräumen und Umbildung der Zahnformen differenzierte sich das Gebiß weiter. Die ursprünglich bunodonten Zähne, wie sie die Nonruminantia haben, sind der Ausgangspunkt für die selenodonten Zähne der Ruminantia. Die Prämolaren sind schmäler als die Molaren. Der Magen ist besonders bei den Wiederkäuern stark kompliziert (s. S. 661), der Darm sehr lang, und ein Blinddarm fehlt nur dem Flußpferd. Ein Os penis ist niemals vorhanden. Der Uterus ist zweihörnig, die Placenta adeciduat und bei den Nonruminantia diffus, ebenso beim Kamel und Zwergmoschushirsch, während sie bei allen anderen Wiederkäuern polykotyledon ist.

1. Unterordnung: Nonruminantia.

Haut mit meist spärlichen Borsten bekleidet, darunter oft ansehnliche Speckschicht; Hörner oder Geweihe fehlen. Der Zwischenkiefer mit wohlentwickelten Zähnen. Mittelhand- und Mittelfußknochen des dritten und vierten Fingers fast stets getrennt. Eckzähne stets vorhanden. Backenzähne bunodont. Unterkieferäste verschmolzen. Magen meist kompliziert, aber nicht zum Wiederkäuen eingerichtet. Zitzen inguinal oder abdominal. Placenta diffus. Hierhin gehören die beiden Familien der Flußpferde (Hippopotamidae) und Schweine (Suidae).

2. Unterordnung: Ruminantia.

Haut meist mit dichtem Haarkleid bedeckt. Dem Zwischenkiefer fehlen fast stets die Schneidezähne. Die Backenzähne mit zwei äußeren und zwei inneren Längskämmen. Die Mittelhand- und Mittelfußknochen fast stets zu einem einzigen langen Knochen (Os canon) verschmolzen. Zweite und fünfte Zehe klein oder fehlend. Unterkieferäste getrennt (nur bei Kamelen verwachsen). Wiederkäuermagen. Zitzen inguinal. Placenta polykotyledon (nur bei den Kamelen diffus). Hierhin gehören die Familien der Kamele (Camelidae), Hirsche (Cervidae), Antilopen (Antilopidae), Rinder (Bovidae), Schafe (Ovidae), Giraffen (Giraffidae) und Moschushirsche (Tragulidae).

15. Ordnung: Hyracoidea.

Die Klippschliefer sind kleinere Tiere von Ungulatentypus, mit dichtem Pelz. Die Vorderextremität ist vierzehig, die hintere dreizehig. Die innere Zehe der letzteren ist beweglich und ihr Nagel ist längsgespalten. Plantigrad mit stark entwickelten Sohlenballen, die ein Festhaften an glatten Felswänden ermöglichen. Die Extremitätenachse geht durch den dritten Finger. Carpus und Tarsus sind serial angeordnet. Das Gebiß ist diphyodont, ein modifiziertes Ungulatengebiß und etwas nagerähnlich durch die Entwickelung immerwachsender halbkreisförmig gebogener Schneidezähne im Zwischenkiefer und Fehlen der Eckzähne. Gebißformel $J\frac{1}{2}\ C\frac{0}{0}\ P\frac{4}{4}\ M\frac{3}{3}$. Die Backenzähne sind lophodont. Magen einfach, Blinddarm groß, außerdem zwei überzählige Blindsäck am Colon. Hoden intraabdominal. Uterus bicornis, Placenta deciduat und gürtelförmig. Zitzen inguinal und axillar. Familien: Procavia. Dendrohyrax, baumlebend.

Verbreitung: Mittel- und Südafrika sowie Syrien, Palästina und Arabien.

16. Ordnung: Proboscidea.

Die Elefanten sind sehr große pflanzenfressende Säugetiere mit spärlicher Behaarung und dicker Haut. Nase und Oberlippe bilden einen langen beweglichen Rüssel mit fingerartigem Fortsatz. Clavicula fehlt. Schädel sehr groß mit dicken pneumatisierten Knochen. Nasenöffnung nach hinten verlagert. Die 5 Zehen mit kleinen Hufen sind zu einem Klumpfuß vereinigt. Carpus und Tarsus serial angeordnet. Das Gebiß ist $J\frac{1}{0}\ C\frac{0}{0}\ Pd\frac{3}{3}\ M\frac{3}{3}$. Die oberen Schneidezähne werden gewechselt und die permanenten werden zu den wurzellosen immerwachsenden, das Elfenbein liefernden Stoßzähnen. Von den Backenzähnen sind nur die vordersten jeweilig im Gebrauch und werden nach Abnutzung durch die nach hinten darauf folgenden ersetzt. Es findet also ein horizontaler, aber in der Zahnzahl begrenzter Zahnwechsel statt. Die Zähne sind aus Höckerzähnen entstanden und weisen eine große Zahl quergestellter, mit Schmelz bedeckter Dentinlamellen auf, die durch Zement verbunden sind. Magen einfach. Blinddarm lang. Hoden abdominal. Uterus zweihörnig. Placenta deciduat, gürtelförmig. Zitzenpaar brustständig.

Verbreitung: Elephas indicus, kleinere Ohren, 5 Hufe vorn, 4 hinten; Südostasien. Elephas africanus, große Ohren, 3 Hufe, Afrika; südlich von der Sahara.

17. Ordnung: Sirenia.

Dauernd im Wasser lebende pflanzenfressende Säugetiere, die durch Konvergenz den Walen ähnlich geworden sind. Der Körper ist gestreckt. Der Kopf ist nur durch eine ventrale Kehlfurche vom Rumpf abgesetzt, ein eigentlicher Hals fehlt. Der Rumpf verjüngt sich allmählich in den Schwanz, der eine horizontale Schwanzflosse trägt. Die Vorderextremitäten sind zu Flossen umgewandelt, die Hinterextremitäten fehlen. Das Haarkleid ist reduziert, aber nicht so stark wie bei den Walen. Der Schädel ist ungulatenähnlich, das Skelett überhaupt schwer, da die Sirenen keine pelagischen Tiere sind. Die äußere Nasenöffnung ist nach oben verschoben, die Nasalia sind rudimentär und können ganz

fehlen (Halicore). Die Halswirbel, von denen Manatus nur 6 hat, sind unverschmolzen. Nur die vordersten Rippen sind mit dem Brustbein verbunden. Die Clavicula fehlt. Vom Becken sind nur Rudimente vorhanden. Das Gehirn ist relativ lang und hoch und furchenarm. Das Geruchsorgan ist noch wenig rudimentär. Das Gehörorgan ist wie das der Wale zum Hören im Wasser eingerichtet, ebenso das Auge zum Sehen im Wasser. Das Gebiß besteht bei Manatus nur aus zahlreichen mit 2 Querjochen versehenen Backenzähnen, die vorn ausfallen und von dem Hinterende der Zahnleiste her neu ergänzt werden. Dieser horizontale Zahnwechsel ist unbegrenzt. Die Entwickelungsgeschichte zeigt aber, daß ursprünglich ein Gebiß von der Formel $J\frac{3}{3}C\frac{1}{1}P\frac{3}{3}M\frac{3-4}{3-4}$ vorhanden war. Bei Halicore fehlt der horizontale Zahnwechsel. Ein Incisivus des Zwischenkiefers entwickelt sich beim Männchen zu einem Stoßzahn. Die embryonal angelegten Antemolaren werden bald resorbiert und ebenso die Backenzähne abgekaut. Das Vorderende des knöchernen Gaumens und der lange Symphysenteil des Unterkiefers sind bei Halicore mit Hornplatten bedeckt. Der Magen ist kompliziert gebaut. Der Darmkanal sehr lang. Ein Blinddarm ist vorhanden. Der Penis hat kein Os penis aufzuweisen. Der Uterus ist zweihörnig, die Placenta adeciduat und gürtelförmig. Die Zitzen sind brustständig. Mit den beiden Familien der Lamantine (Manatidae) und Seekühe (Halicoridae).

Primates.

Aus den zwei Ordnungen der Halbaffen und der Affen bestehende Gruppe. Plantigrade, fünfzehige Tiere mit Plattnägeln, seltener Krallen. Das Gebiß weist einen vollständigen Zahnwechsel auf. Die Molaren sind höckerig, selten mit Querjochen versehen. Orbita mehr nach vorn gerichtet, mindestens mit Orbitalring. Magen fast stets einfach, Blinddarm stets vorhanden. Pflanzenfresser oder omnivor, selten insektivor. Uterus zweihörnig oder einfach. Hoden extraabdominal. Zitzen meist brustständig.

18. Ordnung: Prosimiae.

Baumbewohner mit dichtem Haarkleid, meist Nachttiere. Schwanz meist lang, aber nie zum Greifen eingerichtet. Clavicula stets vorhanden. Daumen und erste Zehe sind stets opponierbar. Die zweite Zehe ist mit einer Kralle versehen, häufig auch die dritte. Augenhöhlen nach vorn gerichtet. Augen meist groß. Gebiß meist $J\frac{2}{2}C\frac{1}{1}P\frac{3}{3}M\frac{3}{3}$. Die Backenzähne sind drei- oder vierhöckerig. Gehirn mit relativ kleinen Großhirnhemisphären, aber gut entwickelten Lobi olfactori. Magen einfach. Blinddarm stets vorhanden. Nahrung: Früchte, Blätter, daneben aber auch Insekten, Vögel usw. Hoden in äußerem Hodensack. Penis pendulus, meist mit Os penis. Uterus zweihörnig. Placenta diffus, nur Tarsius mit scheibenförmiger deciduater Placenta. Zitzen pektoral oder abdominal oder inguinal. Mit den Familien der Tarsiidae, Lemuridae, Indrisidae, Chiromyidae, Galagidae und Lorisidae.

Heimat: hauptsächlich Madagaskar, ferner in den tropischen Wäldern Afrikas und Asiens.

19. Ordnung: Simiae.

Meist Baumbewohner mit fünfzehigen Extremitäten, der Daumen und die große Zehe sind opponierbar und alle Finger und Zehen mit Plattnägeln versehen (ausgenommen die Krallenaffen). Der Schwanz ist verschieden lang und kann bei Mycetes und Cebus zu einem Greifschwanz werden. Der Schädel weist eine bedeutende Größenzunahme der Hirnkapsel auf, entsprechend der starken Entwickelung des Großhirns, welches die übrigen Hirnteile bedeckt. Die Augenhöhlen sind nach vorn gerichtet und durch eine knöcherne Scheidewand von der Schläfengrube geschieden. Das Schlüsselbein ist stets in guter Ausbildung vorhanden. Das Geruchsorgan ist wenig entwickelt. Die Endoturbinalia stellen flache, nicht eingerollte Platten dar und Ectoturbinalia fehlen meist völlig. Dem Auge fehlt ein Tapetum lucidum und ein Musculus retractor bulbi. Das Gebiß ist heterodont und diphyodont und bei den Platyrhinen nach der Formel $\frac{2133}{2133}$ gebaut. Durch Rückbildung eines Molaren ist das Gebiß der Krallenaffen $\frac{2132}{2132}$, und durch Rückbildung eines Prämolaren das der Katarrhinen $\frac{2123}{2123}$ entstanden. Die Backzähne sind stumpfhöckerig. Der Magen ist fast stets einfach, ein Blinddarm ist vorhanden und kann in einen Wurmfortsatz endigen (Anthropoiden). Descensus testiculorum vorhanden. Der Penis pendulus meist mit Os penis. Der Uterus ist ein Uterus simplex, die Placenta ist scheibenförmig und deciduat. Zitzenpaar brustständig.

1. Unterordnung: Platyrhinae.

Südamerikanische Affen. Mit 3 Prämolaren. Knorpelige Nasenscheidewand breit, Nasenlöcher nach außen gerichtet. Kein knöcherner äußerer Gehörgang, Schwanz lang, zuweilen Greifschwanz. Mit den Familien der Hapalidae und Cebidae.

2. Unterordnung: Catarhinae.

Affen der alten Welt, mit 2 Prämolaren und 3 Molaren. Nasenscheidewand schmal, Nasenlöcher nach unten gerichtet. Mit knöchernem äußerem Gehörgang. Plattnägel oder Kuppennägel an allen Fingern und Zehen. Kein Greifschwanz. Mit den Familien der Cercopithecidae, Hylobatidae und Anthropomorphidae.

Phylogenie. Die Frage nach dem Ursprung der Säugetiere ist noch ungelöst. Während die einen die Vorfahren der Säugetiere unter primitiven Amphibien suchen, leiten sie andere von der fossilen Reptiliengruppe der Theromorphen ab, und neuerdings hat man sogar von paläontologischer Seite aus den Versuch gemacht, die Säugetiere auf polyphyletischem Wege direkt von verschiedenen Reptiliengruppen entstehen zu lassen, also z. B. die Delphine von Ichthyosauriern, die Chiropteren von Pterosauriern, die Carnivoren von Theriodontiern usw. Dies zeigt, wie weit die heutige Paläontologie noch entfernt ist, uns eine zufriedenstellende Antwort auf die Frage nach dem Ursprung der Säugetiere zu geben, und es mag daher hier nur versucht werden, die Hauptmerkmale zusammenzustellen, welche die unmittelbaren Säugetiervorfahren ausschließlich auf Grund anatomischer und embryologisch er Untersuchungen gehabt haben müssen. Für den Schädel dieser Promammalia fordert Gaupp folgende Eigenschaften: 1. einen nierenförmigen einfachen Condylus; 2. einen Kopfgelenkapparat, charakterisiert durch Einheitlichkeit des Atlanto-Occipital-Gelenkes, Einheitlichkeit des Atlanto-Epistrophial-Gelenkes und Kommunikation beider; 3. einen Processus basipterygoideus; 4. ein wenn auch niedriges Septum interorbitale; 5. eine in ihrer hinteren Hälfte vom Septum nasi freie Nasenkapsel mit Cartilago paraseptalis; 6. als schalleitenden Apparat einen Steigbügel, aber noch keine differenzierte Extracolumella, also wohl auch kein funktionierendes Trommelfell; 7. ein wenn auch in gewissen Grenzen bewegliches Quadratum; 8. einen Unterkiefer mit einem vorderen zahntragenden und einem kleineren hinteren zahnlosen Abschnitt, die beide in gelockerter Verbindung standen; 9. eine lose Verbindung der beiderseitigen Kieferhälften; 10. einen Jochbogen, an dessen Aufbau das Squamosum beteiligt war.

Damit scheiden aber die Amphibien als direkte Vorfahren der Promammalia gänzlich aus, dagegen erfüllen die gestellten Bedingungen noch am ehesten Rhynchocephalen und Saurier, wenn diese auch natürlich nicht als direkte Vorfahren in Betracht kommen. M. Weber hat das Bild der Promammalia nach anderer Richtung hin vervollständigt. Die Wirbelsäule besaß etwa 20 Brust- und Lendenwirbel und Intercentra. Mit der Verlängerung der Extremitäten erhob sich der Körper über dem Boden, und der Schwanz verlor in gleichem Maße an Länge. Das schmale Schulterblatt ohne Spina war durch ein freies Coracoid mit dem Sternum verbunden. Hand und Fuß waren fünfstrahlig, mit Krallen versehen, und besaßen 2, 3, 3, 3, 3 Phalangen. Ein Centrale carpi war vorhanden; die Tiere waren Sohlengänger. Das Gehirn war klein, die Großhirnhemisphären waren glatt und bedeckten die Vierhügelregion nicht. Ein Corpus callosum fehlte. Es waren 3 bis 5 Ethmoturbinalia vorhanden. Der Gaumen besaß Gaumenleisten. Die hinteren Zähne des Gebisses waren drei- oder mehrspitzig. Der Magen war einfach, der Blinddarm kurz. Eine Kloake war vorhanden. Vielleicht waren die Promammalia ovovivipar. Weber hält die Vorfahren der Ursäuger für sehr kleine insektivore anomodonte Reptilien. Matthew ist der Ansicht, daß die Vorfahren der Säugetiere baumlebend gewesen sind.

Die stammesgeschichtliche Entwickelung innerhalb des Säugetierstammes ist besonders durch zahlreiche paläontologische Funde aufgehellt worden, doch bleiben noch viele Lücken, und die irrige Auffassung, daß Aehnlichkeiten im Bau stets auf Blutsverwandtschaft beruhen müßten, hat vielfach zu falschen phylogenetischen Spekulationen geführt. Erst eine gleichmäßige Berücksichtigung der paläontologischen, anatomischen und embryologischen Tatsachen in Verbindung mit physiologischer Betrachtungsweise wird hier Wandel schaffen, besonders wenn die noch viel zu wenig gewürdigten Konvergenzerscheinungen mehr beachtet und von phylogenetischen Verknüpfungen ausgeschieden werden.

5. Biologie. Die Säugetiere sind den verschiedenartigsten Existenzbedingungen unterworfen, und ihre Körperform hat sich danach angepaßt. Das gilt nicht nur für die ganze Klasse, sondern auch innerhalb einzelner artenreicher Ordnungen sehen wir sehr große Verschiedenheiten in der Lebensweise und damit die Wiederkehr bestimmter Organisationseigentümlichkeiten. So entsprechen der verschiedenen Art und Weise der Fortbewegung tiefgreifende Umformungen mancher Körperteile, in erster Linie natürlich der Extremitäten, und es sind dadurch vielfach Aehnlichkeiten erzeugt worden, die nicht auf engerer Blutsverwandtschaft, sondern auf der Anpassung an die gleiche Lebensweise beruhen. Solche Konvergenzerscheinungen sind gerade bei Säugetieren überaus häufig. Man kann die Säugetiere nach ihrer Bewegung einteilen in laufende, fliegende und schwimmende. An

die laufenden schließen sich an die kletternden und grabenden Säugetiere. Um nur ein gemeinsames Merkmal der laufenden Säugetiere zu nennen, so ist bei ihnen das Schlüsselbein meist rückgebildet, wie das bei den Carnivoren und Ungulaten sowie bei manchen Nagern der Fall ist. Auch die Extremitäten sind bei diesen Formen stark umgebildet, wenn auch in verschiedener Weise; so stützt sich der Körper bei den Perissodactylen mehr und mehr auf den Mittelfinger, während die Extremitätenachse bei den Artiodactylen zwischen den dritten und vierten Finger fällt. Die sich mächtig entwickelnde, bei den Pferden als Huf bezeichnete Hornbildung wiederholt sich ähnlich bei einigen früher als Subungulata zusammengefaßten Nagerfamilien.

Bei den Carnivoren, denen die Extremitäten nicht ausschließlich als Körperstütze dienen, sondern auch zu anderen Funktionen, so dem Ergreifen der Beute, benutzt werden, sind andere Umformungen eingetreten, die, besonders ausgeprägt bei den Feliden, in dem Vermögen gipfeln, die Nagelphalanx völlig zurückziehen zu können. Eine Modifikation der laufenden Bewegung ist die hüpfende, wofür uns die Känguruhs das beste Beispiel bieten. Hier sehen wir die Hinterextremitäten sehr lang und stark werden. Der Schwanz wird zu einem Springschwanz, der das Abschnellen vom Boden unterstützt. Ganz ähnliche Formen finden wir aber auch unter den Insektivoren (Macrocelides) und Rodentiern (Pedetes, Dipus, Gerbillus). Dagegen sind bei den kletternden Säugetieren die Hinterextremitäten mit den Vorderextremitäten im wesentlichen gleichlang. Sehr schön läßt sich das bei jenen Känguruhs verfolgen, welche sekundär eine arboricole Lebensweise angenommen haben (Dendrolagus). Die langen scharfen Krallen der baumkletternden Säugetiere sind eine andere Anpassung. Der Schwanz ist bald buschig wie beim Eichhörnchen und eichhornähnlichen Insektivoren (Tupajidae), bald entwickelt er sich zu einem Greifschwanz, der bei manchen ein nacktes Ende erhalten kann (Phalanger, Erethizon, Cercoleptes, Mycetes, Cebus). Die Opponierbarkeit des Daumens und der großen Zehe ist eine andere Anpassungserscheinung ans Baumleben. Ferner haben manche Säugetiere eigentümliche Bildungen ihrer Fußsohlen, die sie befähigen, sich mittels des atmosphärischen Druckes auf glatten steilen Flächen fortzubewegen (Hyrax, Tupaja, einige Chiropteren, Prosimiae und Simiae).

Ganz anders sind die Umbildungen, welche die grabenden Säugetiere aufzuweisen haben. Vor allem sind die Extremitäten ganz charakteristisch umgeformt, so daß man von einer Grabhand spricht. Vielfach ist der erste und fünfte Finger reduziert, während die drei anderen um so stärker ausgebildet sind und große Grabklauen tragen. Aber auch die Kopfform, die Hautbedeckung, der Schwund der äußeren Ohren, das Rudimentärwerden der Augen, die Kürze des Schwanzes wiederholen sich bei grabenden Säugetieren, von denen hier nur folgende genannt seien, von Monotremen Echidna, von Marsupialiern Notoryctes, der einem grabenden Insektivor Chrysochloris so ähnlich ist, daß man früher an eine Blutsverwandtschaft beider glaubte; auch andere Beuteltiere wie Perameles und Phascolomys führen eine grabende Lebensweise. Von Insektivoren ist ein typischer Gräber der Maulwurf (Talpa), ferner Chrysochloris. Von den Nomarthra ist Orycteropus grabend, von Xenarthra Dasypus. Auch grabende Nager gibt es wie Tamias, Spalax, Microtus, Geomys, Bathyergus, Hystrix u. a., von Carnivoren ist der Dachs (Meles) zu nennen.

Eigentliche fliegende Säugetiere sind nur die Fledermäuse, doch gibt es Uebergänge zu den arboricolen Formen in jenen Säugetieren, welche eine Flughaut besitzen, die als Fallschirm zu wirken hat. Diese kann sehr verschiedenartig ausgebildet sein, bald sich nur zwischen den Extremitäten ausspannen, wie bei den Beuteltieren Acrobates, Petaurus und Petauroides, oder auch vom Kopf am Hals entlang zu den Vorderextremitäten reichen, wie bei den Nagern Pteromys und Sciuropterus, oder den Schwanz mit den Hinterextremitäten verbinden (Anomalurus, Idiurus). Sehr wohl entwickelt ist die Flughaut bei Galeopithecus, wo sie vom Halse an die Extremitäten bis zu den Krallen und ebenso den Schwanz einhüllt. Auch unter den Halbaffen finden wir eine Gattung Propithecus mit einer allerdings wenig ausgebildeten Flughaut. Nur bei den Fledermäusen hat sich die Flughaut zu wirklichen Flügeln entwickelt. Dies geschah, indem die Finger mit Ausnahme des Daumens sich sehr stark verlängerten, so daß sich die Flughaut dazwischen in großer Breite ausspannen konnte. Auch das übrige Skelett steht stark unter dem Einfluß der Mechanik des Fluges. Sogar ein Kiel wie bei den Carinaten unter den Vögeln entwickelt sich auf dem Brustbein bis zum Ansatz der starken Brustmuskeln.

Sehr tiefgreifend sind die Umformungen, welche der Säugetierkörper durch die Anpassung an die schwimmende Lebensweise erhalten hat. Man muß dabei unterscheiden zwischen solchen Formen, die nur zeitweilig im Wasser leben und solchen, die sich dauernd darin aufhalten. Erstere kann man als temporäre, letztere als stationäre Wassersäugetiere bezeichnen. Zu den letzteren gehören die drei Ordnungen der Sirenen, Zahnwale und Bartenwale.

Bei den temporären Wassersäugetieren ist der Grad der Umformung viel geringer als bei

den stationären und hängt im wesentlichen von der Zeitdauer ab, welche diese Tiere im Wasser verbringen. Gemeinsam ist ihnen allen eine Verkürzung der Extremitäten, besonders in ihrem proximalen Teile und die Ausbildung von Schwimmhäuten zwischen den Zehen. Dazu kommt vielfach die Ausbildung eines sehr dichten kurzen Haarkleides, welches viele dieser temporären Wassersäugetiere zu besonders geschätzten Pelztieren macht (Biber, Nörz, Otter, Seeotter, Pelzrobbe), sowie eines komprimierten Ruderschwanzes. Zu diesen temporären Wassersäugetieren zählen von Monotremen Ornithorhynchus, von Beutlern Chironectes, von Insektivoren Myogale, Crossopus fodiens, Potamogale, Limnogale, von Nagern Castor, Ichthyomys, Fiber, Hydromys, Myocastor, Hydrochoerus, von Raubtieren der Nörz, Fischotter und Seeotter, und die gesamte Ordnung der Pinnipedier. Von diesen haben die Ohrenrobben noch am meisten den Landtiercharakter bewahrt, weniger die Walrosse und am wenigsten die Seehunde. Von Ungulaten wäre das Flußpferd als amphibiotisch zu nennen. Bei den stationären Wassersäugetieren, den Sirenen, Zahnwalen und Bartenwalen feiert die konvergente Züchtung ihre höchsten Triumphe. Diese 3 Ordnungen weisen so viel äußerliche Aehnlichkeiten auf, daß man sie bis heute noch vielfach in einer Ordnung der Cetomorpha vereinigt. Nun steht es aber fest, daß die Sirenen einen ganz anderen Ursprung gehabt haben als die Wale, so daß also die gemeinsamen Aehnlichkeiten unbedingt konvergente Züchtungen sein müssen. Bei Zahn- und Bartenwalen hält dagegen die große Mehrzahl der Forscher noch heute an einer engeren Blutsverwandtschaft fest und vereinigt sie in eine Ordnung. Die von mir aufgestellte Ansicht, daß auch hier die Aehnlichkeiten nur Konvergenzen sind, und daß beide Ordnungen der Zahn- und Bartenwale von getrennten landlebenden Vorfahren abstammen, hat bis jetzt wenig Zustimmung gefunden. Dennoch bleibe ich bei meiner Auffassung. Als solche konvergente Züchtungen der stationären Wassertiere sind aufzufassen der spindelförmige Körper, mit glatter Oberfläche und Verlust des dichten Haarkleides. Als Wärmeschutz tritt dafür eine dicke Speckschicht im Unterhautbindegewebe ein. Der Reibung im Wasser ist auch das äußere Ohr zum Opfer gefallen und als Fortbewegungsorgan hat sich eine aus lateralen Hautfalten entstandene horizontale Schwanzflosse ausgebildet. Die Vorderextremitäten fungieren als Gleichgewichtsorgane und als Steuer und sind zu breiten Flossen umgebildet, aber nur in ihrem distalen Teil, während der proximale sich verschieden weit in den Körper zurückgezogen hat. Die Hinterextremitäten fehlen stets, sind aber bei kleinen Embryonen deutlich angelegt (Fig. 42). Von Sinnesorganen ist das Gehör das am höchsten ausgebildete und in ganz charakteristischer Weise zum Hören im Wasser umgeformt. Das Auge ist ebenfalls dem Sehen im Wasser angepaßt, mit kugeliger Linse und flacher Hornhaut. Bei Sirenen ist das Geruchsorgan noch funktionierend, wenn auch nicht besonders hoch differenziert. Bei Bartenwalen und noch mehr bei Zahnwalen ist es rudimentär geworden. Das schnelle Durchschneiden des Wassers beim Schwimmen hat umformend auf die Schädelbildung eingewirkt. So ist der das Gehirn umschließende Teil der Schädelkapsel stark in der Längsachse verkürzt, in der Querachse verbreitert, und die Form des Gehirns ist dem gefolgt. Da die Vorwärtsbewegung durch das Schlagen der Schwanzflosse eine drehende Komponente enthält, ist der vordere Schädelteil asymmetrisch geworden, bei den Zahnwalen in viel höherem Maße als bei den Bartenwalen, bei denen aber auch eine Verschiebung der Schnauzenachse nach links konstatiert werden kann. Der starke, von vorn kommende Wasserdruck hat ferner umformend auf die Halswirbelsäule gewirkt, deren 7 Wirbel eng aneinandergerückt und in verschiedenem Grade miteinander verschmolzen sind. Dementsprechend fehlt ein äußerer Hals und der Kopf geht ohne Absatz in den Rumpf über. Das Skelett der Vorderextremität weist vor allem eine Zunahme der einzelnen Skelettelemente der Finger auf. Besondere Eigenschaften haben sich bei den Walen entwickelt durch Anpassung an das Tauchen, wie Umformungen und Verschlüsse der Nase, sowie Schutz einzelner Organe gegen den Druck des Wassers, so weist das Auge eine enorm dicke und feste Sklera auf. Die Blutzufuhr des Kopfes wird nicht mehr durch die außen gelegene Carotis bewirkt, sondern durch Blutgefäße, die im Wirbelkanal, also vor dem Wasserdruck völlig geschützt, verlaufen. Alle diese und zahlreiche andere Anpassungen haben die große Aehnlichkeit des Körpers der Zahnwale und der Bartenwale hervorgerufen. Demgegenüber stehen aber so tiefgreifende Unterschiede, die meist erst durch die Entwickelungsgeschichte erkannt worden sind, daß, meiner Auffassung nach, beide Ordnungen nicht von den gleichen landlebenden Vorfahren abstammen können, sondern unabhängig voneinander entstanden sein müssen.

Ein anderer Faktor, der einen großen Einfluß auf den Säugetierkörper ausgeübt hat, ist die Art der Nahrungsaufnahme. So haben Pflanzenfresser andere Darmverhältnisse aufzuweisen als Fleischfresser. Schon die Länge des Darmes ist bei ersteren viel größer, dann kommt es zur Ausbildung eines meist sehr ansehnlichen Blinddarmes, und vielfach ist auch der Magen kompliziert gebaut, wie bei den Wiederkäuern oder den blätterfressenden Faultieren. Ein besonders interessantes Kapitel ist die der Nahrungsaufnahme angepaßte Form des Gebisses. Bei Tieren, welche nagen, bilden sich Schneidezähne zu immerwachsenden großen Nagezähnen um. Das ist nicht nur innerhalb der Ordnung der Rodentia der Fall, sondern findet sich auch unter den Beuteltieren beim Wombat (Phascolomys), unter den Prosimiern beim Fingertier (Chiromys). Bei ausgesprochenen Pflanzenfressern findet man lophodonte oder selenodonte Backenzähne, deren Kronen bald abgekaut werden, so daß die zwischen Dentin und Zement vortretenden harten Schmelzfalten zum Zerreiben der Nahrung benutzt werden. Fleischfresser dagegen haben ein Gebiß mit meißel-

förmigen Schneidezähnen, großen spitzen Eckzähnen und spitz- und scharfkantige, teilweise auch mit Schneiden versehene Backenzähne, die scherenartig wirken. Solche Gebisse finden sich bei Raubbeutlern in ganz ähnlicher Ausbildung wie bei den monodelphen Carnivoren. Bei jenen Formen, welche hauptsächlich von Fischen leben, werden die einzelnen Zähne gleichartiger. Das ist schon bei den Seehunden angebahnt und tritt noch mehr bei den Delphiniden in Erscheinung, wo die einzelnen Zähne sekundär wieder zu einfacher spitzer Kegelform zurückgekehrt sind, und sich außerdem durch Ausbildung neuer Zähne am Hinterende der Zahnleiste vermehrt haben.

Eigenartige Anpassungen haben die ameisen- und termitenfressenden Säugetiere aufzuweisen, von denen hier folgende zu erwähnen sind, von Monotremen Echidna, von Beutlern Myrmecobius, von Nomarthra Orycteropus und Manis, von Xenarthra Myrmecophaga. Diesen Formen gemeinsam ist eine lange röhrenförmig verlängerte Schnauze mit verminderter Kaufunktion, ein rudimentär werdendes, teilweise gänzlich geschwundenes Gebiß, eine meist enge Mundspalte, eine lange, weit vorstreckbare, wurmförmige Zunge und wohl ausgebildete Munddrüsen.

6. Geographie. Die heutige geographische Verbreitung der Säugetiere ist ein Produkt verschiedener Faktoren. Früher nahm man an, daß die Hauptrolle bei der Verbreitung die Existenzbedingungen spielten, denen die Tiere in den verschiedenen Gebieten der Erde unterworfen sind, und besonders das Klima war es, dem man größte Wichtigkeit zumaß. Von dieser Anschauung sind wir heute abgekommen. Sehen wir uns, um nur ein Beispiel herauszugreifen, die Verbreitung des Tigers an. Wir haben uns daran gewöhnt, den Tiger als unzertrennlich von den glühend heißen Djungeln Indiens anzusehen. Die Verbreitung des Tigers ist aber eine viel weitere. Er kommt vor im Kaukasus und dem Altaigebirge und auf den Schneefeldern des Himalaja werden seine Fußspuren gefunden. Selbst im Winter streift er an den vereisten Rändern des Aralsees herum, findet sich in den kalten Ebenen der Mandschurei und des Amurgebietes und ist noch in der Nachbarschaft des Baikalsees und von Irkutsk zu Hause. Von Affen, die als besonders dem heißen Klima angepaßte Tiere gelten, ist zu berichten, daß sie im Himalaja bis zu Höhen von 3500 m beobachtet werden, wo sie munter in den schneebedeckten Nadelholzbäumen herumklettern, und diese Beispiele ließen sich leicht vermehren. Sie zeigen uns, daß der Einfluß des Klimas auf die Verbreitung der Tiere nicht überschätzt werden darf. Keinesfalls ist das Klima ein generelles Prinzip, nach welchem sich die Tierverbreitung geregelt hat, sonst müßten z. B. in den Tropenregionen Amerikas, Afrikas, Asiens und Nordaustraliens die gleichen Tierformen wiederkehren, was bekanntlich nicht der Fall ist. Aber auch die heutige Verbreitung von Land und Wasser, die Topographie, ist kein solches, die Tierverbreitung regelndes generelles Prinzip, denn viele Verbreitungstatsachen lassen sich dadurch nicht erklären, z. B. die diskontinuierliche Verbreitung mancher Tierformen. So finden sich Tapire nur in Südamerika und in Hinterindien, anthropoide Affen nur in Hinterindien und Westafrika, der Lamantin nur im zentralen Ostamerika und in Westafrika, der Schneehase in den Alpen und im nördlichen Europa. Nur die Erdgeschichte ist imstande, diese Fragen zu lösen (vgl. den Artikel „Formationen"). Eine befriedigende Erklärung der heutigen Tierverbreitung kann also nur durch die Erdgeschichte gegeben werden, natürlich unter Berücksichtigung der heute wirksamen physikalischen Faktoren. Damit erheben sich aber für das Studium der Tierverbreitung große Schwierigkeiten, da wir noch weit von einem befriedigenden Einblick in die Vorgeschichte der Tiere entfernt sind. Dabei liegen für die Säugetiere die Verhältnisse noch relativ günstig, da wir von ihnen zahlreiche paläontologische Funde haben, die sich für unsere Studien verwerten lassen.

Als man noch einen weniger historischen und einen mehr topographischen Standpunkt einnahm, teilte man die Oberfläche der Erde auf Grund der Verteilung der Säugetiere in tiergeographische Regionen ein, die ungefähr der rein geographischen Einteilung der Festlandsmassen entsprachen. Nach Wallace waren es:

1. Die Paläarktische Region. Sie umfaßt Europa, Nordafrika bis zum Rand der Wüste, Nord- und Zentralasien bis zum Himalaja und das nördliche Ostasien, Japan eingeschlossen.

2. Die Aethiopische Region, das übrige Afrika und Madagaskar.

3. Orientalische Region. Der südliche Teil Asiens und der westliche Teil des indoaustralischen Archipels.

4. Australische Region. Australien, Neu-Guinea mit dem östlichen Teil des indoaustralischen Archipels, Neuseeland und Polynesien.

5. Nearktische Region. Nordamerika bis Mexiko.

6. Neotropische Region. Zentral- und Südamerika und die Antillen.

Auch erhob sich darüber ein Streit, ob das arktische Gebiet als eine besondere tiergeographische Region oder nur eine Subregion aufzufassen sei. Der Wert dieser Einteilung ist zweifellos überschätzt worden, denn den erdgeschichtlichen Tatsachen wird sie nicht gerecht. Früher nahm man ohne weiteres an, daß die Grenzen der Kontinente zu allen geologischen Epochen im großen und ganzen die gleichen geblieben seien, während heute diese Lehre von der Permanenz der Kontinente nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Haben aber in früheren Erdepochen andere Verteilungen von Land und Wasser vorgelegen, so sind auch die Bedingungen der Verbreitung der Tiere andere gewesen als zur Jetztzeit und schon daraus erhellt, daß das Studium der geographischen Verbreitung der Tiere mit dem der erdgeschichtlichen Veränderungen unlösbar verknüpft ist. Eine vertiefte Erkenntnis bringt uns zunächst die Einteilung der Tierwelt in einzelne Lebensbezirke, nämlich die des Landes, des Süß- und Seewassers. Letzterer läßt sich weiter in die drei Lebensbezirke des Litorals, Pelagials und Abyssals zerlegen. Für die Säugetiere kommt fast ausschließlich der Lebensbezirk des festen Landes in Betracht, und nur Pinnipedier, Sirenen und Wale machen eine Ausnahme und sind dem Wasserbezirk zuzuteilen. Wie wichtig die Einteilung in verschiedene Lebensbezirke ist, erhellt schon daraus, daß für jeden Lebensbezirk eine verschiedene Art der Ausbreitung und ebenso eine Verschiedenheit in der Art der Hemmnisse der Ausbreitung existiert. Auf Grund der Entwickelungsgeschichte müssen wir annehmen, daß jede Art an einem Punkte der Erde entstanden ist, und wir bezeichnen diesen Punkt als Entstehungszentrum der Art. Natürlich kann man auch Entstehungszentren für Gattungen und höhere systematische Kategorien annehmen. Dem natürlichen Triebe der Ausbreitung folgend wanderten die Nachkommen aus, immer neuen Boden erobernd, bis sich ihrem Vordringen unüberwindliche Hindernisse entgegenstellten. Die Mittel der Ausbreitung sind bei den Säugetieren des Landbezirkes vor allem aktive, durch Eigenbewegung. Passive Verbreitungsmittel spielen daneben eine ganz untergeordnete Rolle. So ist die Möglichkeit zuzugeben, daß treibende Baumstämme oder auch ganz große natürliche Flöße mit aufrechtstehenden Bäumen stromabwärts treibend ins Meer gelangen und die auf ihnen lebenden unfreiwilligen Passagiere nach anderen Gegenden befördern. Immerhin ist aber diese Art der Verbreitung als eine ganz besondere Ausnahme anzusehen und auf keinen Fall ein Faktor von allgemeiner Bedeutung. Jedenfalls ist die Zahl der Beobachtungen über derartige zufällige passive Tiertransporte auffällig gering. Die aktiven Wanderungen der Säugetiere bringen es mit sich, daß in jedem Gebiete sich neben Formen, die in ihm ihr Entstehungszentrum gehabt haben, andere finden, die eingewandert sind. Man kann daher in der Fauna eines jeden Landes Autochthonen und Immigranten unterscheiden.

Von den Barrieren, welche das Vorwärtsdringen einer landlebenden Säugetierart zu hemmen vermögen, ist in erster Linie das Wasser zu nennen. Obwohl fast alle Säugetiere zu schwimmen vermögen, so ist diese Fähigkeit doch eine begrenzte, und ein breiterer Meeresarm ist für sie ein unüberschreitbares Hindernis. Das erklärt, weshalb auf den ozeanischen Inseln Säugetiere fast völlig fehlen, nur Fledermäuse, denen infolge ihres Flugvermögens das Wasser kein Hindernis bildet, und vom Menschen eingeschleppte Formen kommen hier vor. Kontinentale Inseln, die früher mit dem Festlande in Zusammenhang gestanden haben, können natürlich eine viel reichere Säugetierfauna beherbergen, denn sie waren meist bereits mit Säugetieren besiedelt, ehe das einbrechende Meer sie abtrennte.

Wie Meeresarme, so sind auch große Flüsse sehr wirksame Hindernisse der Ausbreitung. So vermag das Wasserschwein (Hydrochoerus), jenes große, den La Platastrom bewohnende Nagetier, trotz seiner vorzüglichen Schwimmfähigkeit diesen Strom nicht zu überkreuzen und kommt nur am Ufer von Uruguay, nicht aber am argentinischen Ufer vor. Gelegentlich kann allerdings das Wasser seine Rolle als Schranke für die Landsäugetiere aufgeben; wenn es nämlich gefriert, so wissen wir, daß die Renntiere weite Wanderungen über das Meereis unternehmen können, z. B. in jedem Frühjahr von dem Lenadelta zu den Weidegründen der neusibirischen Inseln wandern, um im Herbst wieder zum asiatischen Festlande zurückzukehren. Treibeisschollen führen den Eisbär oft weit ins Meer hinaus, so daß er gelegentlich an Küsten von Ländern erscheint, denen er sonst fremd ist.

Ebenso wirksam als Barriere für die Landsäugetiere wie das Wasser ist die Wüste, die z. B. für alle im Walde lebenden Tiere eine absolute Scheide ist. Wenn wir daher finden, daß der jetzt auf das Waldgebiet Westafrikas beschränkte Schimpanse in einer früheren Erdperiode auch in Nordindien gelebt hat, wie fossile Funde beweisen, so können wir nur annehmen, daß die zwischen beiden Fundorten liegenden Steppen- und Wüstenstrecken erst zu einer späteren Zeit entstanden sind, und daß früher an deren

Stelle ausgedehnte Waldgebiete existiert haben müssen.

Auch Gebirge sind vielfach wirksame Hemmnisse für die Ausbreitung der Säugetiere, ein weiteres ist aber der Mensch, der andererseits ausbreitend gewirkt hat. Er hat zahlreiche Säugetiere, besonders Haustiere, nach Ländern gebracht, denen sie ursprünglich fremd waren. Mit der Entwickelung der Schiffahrt haben sich Mäuse und besonders Ratten auf der ganzen Erde verbreitet, aber auch mit den absichtlich neu eingeführten Säugetieren hat der Mensch nicht immer eine glückliche Hand gehabt. Man denke nur an die Kaninchenplage in Australien, oder an die Einführung des indischen Ichneumons auf die Antillen, welche zum Kampfe gegen die überhandnehmende Rattenplage, auch wohl gegen Giftschlangen aufgeboten wurden. Sie haben sich z. B. auf Jamaika so stark vermehrt und dezimieren die Haushühner der dortigen Negerbevölkerung derart, daß sie zu einer schrecklichen Landplage geworden sind. Es ist das eine ernste Warnung, diesen mißglückten Versuch anderswo zu wiederholen. Viel einschneidender aber hat der Mensch in vorhistorischen und historischen Zeiten die Säugetierfauna verändert, indem er sich an der Ausrottung vieler Arten beteiligt hat. Freilich gehe ich nicht so weit wie manche Paläontologen, die das Verschwinden vieler tertiärer Tierarten ausschließlich dem Menschen zur Last legen.

Neuere Forschungen haben uns gezeigt, daß sich für die Säugetiere drei große Entstehungszentren annehmen lassen, das eine, in Australien gelegen, ist die Notogaea, das Reich der Beuteltiere, das zweite, die Neogaea, liegt in Südamerika, und das dritte größte ist die nur Monodelphier enthaltende Arktogaea, alle übrigen Festlandsmassen umfassend. Daneben gibt es kleinere Entstehungszentren, so ist z. B. Afrika als Entstehungszentrum zahlreicher Antilopenarten zu betrachten. Auch lassen sich Uebergangsgebiete feststellen.

Wir beginnen mit der Notogaea. Charakteristisch für sie ist das Ueberwiegen der Beuteltiere. Auch ist sie die Heimat der Monotremen. Von Monodelphiern sind nur wenige Formen anzutreffen. Nur aus der Ordnung der Nagetiere sind etwa 50 Mäusearten von altertümlichem Typus bekannt. Der Dingo (Canis dingo) ist wahrscheinlich in alten Zeiten vom Menschen eingeschleppt worden. Als spätere Immigranten sind die Fledermäuse zu betrachten. Zur Notogaea werden außer dem australischen Festlande mit Tasmanien, noch Neu-Guinea, nebst Aru- und Keiinseln, ferner Neuseeland und Polynesien gerechnet. Das relativ hohe Alter der Säugetierwelt der Notogaea läßt sich vor allem dadurch erklären, daß sich Australien schon zu früher geologischer Zeit von dem Zusammenhang mit den anderen Festlandsmassen löste. Im mittleren Mesozoikum war aber eine Brücke zum asiatischen Kontinent jedenfalls vorhanden, auf der die Vorgänger der heutigen Monotremen nach Australien gelangen konnten. In der Kreidezeit wurde dieser Zusammenhang aufgegeben und damit mußte die Einwanderung von Säugetieren von Asien zunächst aufhören. Gleichzeitig soll aber Australien mit Südamerika über Polynesien in Zusammenhang gestanden und einen großen Südkontinent gebildet haben, den v. Ihering als „Archinotis" bezeichnet. Von diesem löste sich zuerst Neuseeland ab. Es kam auf dieser Brücke zum Ueberwandern von gewissen Beuteltieren, aber nicht mehr von Monodelphiern, da sie schon im frühen Tertiär verschwand. Nach dem Miocän ist aufs neue eine allerdings nicht vollständige Landverbindung zwischen Australien und Asien erfolgt, die wohl von den in Australien vorhandenen Muriden als Brücke benutzt worden ist. Ueber eine frühere Verbindung Australiens mit dem antarktischen Kontinent ist bis jetzt nichts Sicheres bekannt. Wäre sie vorhanden gewesen, so hätte der antarktische Kontinent als Brücke für die Südkontinente dienen können.

Wie schwankend aber noch unsere Vorstellungen von diesen ehemaligen Landverbindungen sind, geht daraus hervor, daß von anderer Seite ein indopazifischer Kontinent angenommen wird, der sich von Afrika durch den indischen Ozean bis zu den Fidjiinseln erstreckt haben soll.

Auch über die Herkunft der Beuteltiere in Australien sind die Meinungen geteilt. Wallace und auch Lydekker nehmen an, daß primitive Marsupialier vom Typus der Didelphiden, in früher mesozoischer Zeit von Indien her nach Australien eingewandert sind, und M. Weber schließt sich dieser Ansicht an. Die in Südamerika vorkommenden Beuteltiere mußten alsdann von Australien her eingewandert sein. Andere Forscher dagegen, unter ihnen Th. Arldt (1907), nehmen umgekehrt an, daß die Heimat der spezialisierten Beuteltiere in Südamerika zu suchen ist, und daß sich sowohl Diprodontier wie Polyprodontier bereits dort ausgebildet hatten, die dann in der älteren Tertiärzeit von Patagonien nach Australien wanderten, entweder über die Archinotis oder auf einem südlicheren Wege über den antarktischen Kontinent, in beiden Fällen aber unter Uebergehung von Neuseeland. In Australien erfolgte dann eine weitergehende Differenzierung.

Die Neogaea entspricht der neotropischen Region von Wallace, wird also vom südamerikanischen Kontinent repräsentiert, dem sich Zentralamerika und die westindische Inselwelt zugesellen. Nur in der Neogaea finden sich außer in der Notogaea auch Beuteltiere vor, und zwar nicht nur vom Typus der Polyprotodontier, sondern auch von mehr Diprotodontiertyp (Caenolestes). Von ersterer Gruppe ist nur die Familie der Didelphiden in der Neogaea vertreten, von denen einige Vertreter (Opossum) auch nach Nordamerika eingewandert sind. Zahlreiche Beuteltierreste finden sich bereits in den oligocänen St. Cruz-Schichten Patagoniens vor, und ein ehemaliger Zusammenhang mit Australien ist, wie bereits bei Besprechung der Notogaea ausgeführt wurde, mit gutem Grunde anzunehmen. Aber auch die Beziehungen zur altafrikanischen Säugetierfauna sind deutlich

ausgeprägt und es wird eine südatlantische Landbrücke zwischen Afrika und Südamerika angenommen. Arldt kommt zu folgender Ansicht über die Entwickelung der Tierwelt der St. Cruz-Schichten. Im Mesozoikum entwickelte sich in Südamerika aus dem Allotherienstamme eine Marsupialierfauna in den beiden Aesten der Poly- und der Diprotodontier. Während der oberen Kreidezeit trat eine Verbindung mit Nordamerika ein. Die Didelphiden wanderten nach Norden, dafür kamen nordische Formen ins neotropische Gebiet. Dieses trat in der Kreidezeit auch mit Australien in Verbindung und tauschte mit diesem Faunen- und Florenelemente aus. Jedenfalls noch in der Kreidezeit trennte ein Meeresarm Argentinien und Patagonien von Brasilien, während der nördliche Teil noch mit Nordamerika verbunden war. Mit dem Beginn der Tertiärzeit wanderten über die wiederhergestellte Brücke die Placentalier ein, die sich inzwischen im Norden entwickelt hatten und breiteten sich, da sie den Marsupialiern überlegen waren, rasch über Brasilien und Afrika aus. Noch im Eocän löste sich die Verbindung zwischen diesen beiden Ländern, wie zwischen Patagonien und Australien, und die beiden Teile Südamerikas vereinigten sich wieder. Die in Patagonien noch weiter spezialisierten und vervollkommneten Marsupialier mischten sich mit den brasilianischen Monodelphiern, im Wettbewerb unterlagen sie aber ebenfalls. Im Miocän sind sie fast vollkommen verschwunden, nur die Gattung Caenolestes hat sich in Ecuador erhalten. Die Verbindung mit Nordamerika muß ebenfalls noch im Eocän gelöst worden sein. Dadurch erklärt sich die Tatsache, daß die afrikanischen Typen zum Teil altertümlicher erscheinen als die neotropischen. Während der Tertiärzeit entwickelte sich in der Neogaea eine reiche endemische Fauna, die nur zum Teil zugrunde ging, als eine neuerliche, im Pliocän erfolgte Verbindung mit Nordamerika eine neue Einwanderung nordischer Monodelphier ermöglichte. Unter den rezenten Säugetieren, welche für die Neogaea charakteristisch sind, sind zunächst die den Beuteltieren zugehörigen Didelphiden und der zu den Diprotodontiern überleitende Caenolestes zu nennen, ferner die ausschließlich auf die Neogaea beschränkte Ordnung der Xenarthra mit den Familien der Faultiere (Bradypodidae), Ameisenbären (Myrmecophagidae) und Gürteltiere (Dasypodidae). Außer den zahlreichen, in der Neogaea entstandenen und später ausgestorbenen Ung.latengruppen finden sich von lebenden Ungulaten noch eigentümliche Hirschgattungen, Lamas, Dicotyliden und amerikanischer Tapir. Insektivoren fehlen dem Kontinent völlig, nur in Kuba und Haiti kommt die Familie der Solenodontidae vor, die mit den madagassischen Centetidae sehr nahe verwandt sind. Carnivoren sind nur spärlich vorhanden und jedenfalls erst später eingewandert. Hyänen und Zibetkatzen fehlen völlig. Von Nagetieren existiert in der Neogaea eine große Zahl eigener Gruppen, während Mäuse, Biber, echte Stachelschweine usw. fehlen. Halbaffen fehlen gänzlich und von Affen treten nur die platyrhinen Formen der Hapalidae und Cebidae auf.

Wir kommen nunmehr zur Arctogaea, die alle übrigen Landmassen umfaßt. Sie ist als Entstehungszentrum fast aller Monodelphier zu betrachten und nach mehr topographischen Gesichtspunkten in folgende 4 Regionen eingeteilt: 1. holarktische, 2. äthiopische, 3. madagassische, 4. orientalische Region.

Die holarktische Region zerfällt in 2 Untergebiete, die nearktische (Nordamerika) und die paläarktische (Eurasien), von denen die nearktische durch das sonorische Uebergangsgebiet mit der Neogaea, die paläarktische durch das Mittelmeerübergangsgebiet mit der äthiopischen Region verbunden ist. Auch an die orientalische Region schließt sich ein Uebergangsgebiet an, das indoaustralische, das sie mit der Notogaea verbindet. In der Arctogaea fehlen Monotremen sowie Beuteltiere (ausgenommen die Opossums in Nordamerika), ebenso fehlen die Xenarthra, sowie die platyrhinen Affen. Dafür sind alle anderen Ordnungen der Monodelphia in der Arctogaea vorhanden.

Die holarktische Region umfaßt Europa mit Nordafrika, das nördliche Asien und fast ganz Nordamerika. Dem Vorgange von Wallace folgend, teilen wir sie in die nearktische und die paläarktische Subregion ein. Zwischen beiden hat bis zum Oligocän eine nordatlantische Landbrücke bestanden, und nach deren Verschwinden ist ein weiterer Austausch über Asien erfolgt. Indessen ist die Zahl der beiden Subregionen eigentümlichen Tierarten nicht groß, sei es, daß die nordatlantische Brücke zu hoch im Norden lag, als daß sie von südlicheren Formen benutzt werden konnte, sei es, daß nearktisches und paläarktisches Gebiet seit der Trennung selbständige Entwickelungszentren geworden sind. Nur im hohen Norden wird die Säugetierfauna beider Gebiete immer ähnlicher, um in der Arktis zuletzt fast identisch zu werden. Nach Arldt stellt sich die Geschichte der holarktischen Region folgendermaßen dar. Am Ende des Mesozoikums fanden sich an ihrer Stelle zwei Landmassen, von denen die eine, der nordatlantische Kontinent, Nordamerika und einen Teil Europas umfaßte, die andere den größten Teil Asiens. Der nordatlantische Kontinent trat noch in der Kreidezeit mit der Neogaea in Verbindung und es kam zu einem Austausch von Formen. Seit dem Eocän aber war diese Verbindung unterbrochen. Am Ende des Oligocäns vereinigte sich der europäische Anteil des nordatlantischen Kontinents mit der nordasiatischen Landmasse, und ungefähr zur gleichen Zeit wurde durch den sich neubildenden nordatlantischen Ozean Europa von Nordamerika völlig getrennt. Im Beginn der Miocänzeit erfolgt eine kurze Verbindung Europas mit der äthiopischen Region. Im Norden konnte ein Formenaustausch des nearktischen und paläarktischen Gebietes nur über eine nordpazifische Brücke stattfinden. Auch die um diese Zeit angegliederte orientalische Region gab im Pliocän der holarktischen Region einige Formen ab, und ebenso wurde zu dieser Zeit Europas Fauna durch afrikanische Formen, die Nordamerikas durch südamerikanische Formen bereichert. Erst in der Diluvialzeit versank die Brücke zwischen Asien und Nordamerika. Damit haben wir eine erdgeschichtliche Grundlage gewonnen, die für die Erklärung der heutigen Säugetierverbreitung in der holarktischen Region unerläßlich ist. Beiden Subregionen gemeinsam oder doch durch ähnliche Formen vertreten sind

folgende, zum guten Teil arktische Arten. Eisbär, brauner Bär, Luchs, europäischer und kanadischer Wolf, Vielfraß, Fuchs, Edelmarder, Hermelin, Wiesel, gemeines Backenhörnchen, arktische Wühlmaus, drei Lemmingarten, Biber (europäischer und kanadischer), Schneehase, Bison (europäischer und amerikanischer), Kamtschatka- und Dickhornschaf, Moschusochse, Elch, Renntier, Wapiti (Cervus canadensis und Cervus eustephanus). Dagegen fehlen Nordamerika an europäischen Tieren Reh, Wildschwein, Dachs, Maulwurf und alle echten Mäuse, während es Europa gegenüber eine ganze Anzahl von anderen Formen als ihm eigentümlich aufweist, so Haplocerus, Erethizon, Fiber, Synaptomys, Phenacomys, Haplodon, Condylura, Neosorex. Dazu kommen noch von der Neogaea eingewanderte oder wenigstens aus dem sonorischen Uebergangsgebiet stammende Formen, wie gewisse Hirsche der Gattung Cariacus, sowie Antilocapra. Als Charaktertiere der paläarktischen Subregion kommen vor allem in Betracht die Gattungen: Camelus, Moschus, Capreolus, Cervus, Saiga, Addax, Rupicapra, Budorcas, Eupetaurus, Myoxus, Muscardinus, Cricetus, Ellobius, Siphneus, Spalax, Sminthus, Dipus, Echoretes, Platycercomys, Alactaga, Ctenodactylus, Aeluropus, Aelurus, Meles, Uropsilus, Scaptonix, Talpa (auch in der orientalischen Region), Nectogale, Diplomecodon, Crossopus. Ein Teil dieser Formen ist jedenfalls aus der orientalischen Region eingewandert. Addax und Ctenodactylus sind äthiopischer Herkunft. Die Familien, zu denen alle diese Gattungen gehören, sind vielleicht mit Ausnahme der Cameliden nicht über die Grenzen der paläarktischen Subregion hinaus verbreitet. Primaten sind nur an wenigen Stellen (Gibraltar, Japan, Peking, Tibet) in diese Subregion vorgedrungen, an den drei ersten Oertlichkeiten zur Gattung Macacus, in Tibet der Gattung Rhinopithecus zugehörig.

Innerhalb des paläarktischen Gebietes werden noch weitere Einteilungen gemacht. So spricht man von einer arktischen Subregion, da indessen die darin vorkommenden Säugetiere gering an Zahl sind und ihre nächsten Verwandten in südlicheren Gebieten haben, wäre es richtiger, statt dessen von einem durch Schnee, Eis und Kälte charakterisierten „Standort" zu sprechen. Eine europäische Subregion mit typischer paläarktischer Fauna umfaßt Europa nördlich von einer die Pyrenäen mit den Alpen verbindenden und zur Nordküste des Schwarzen Meeres ziehenden Linie. Südlich davon liegt die mittelmeerische. Zu diesem auch als Uebergangsgebiet zur äthiopischen gerechneten Gebiete rechnet man außer Südeuropa noch Nordafrika, das nördliche Arabien, Kleinasien, Persien, Belutschistan und Afghanistan. Auch die ostatlantischen Inselgruppen bis zu den Azoren werden vielfach dazu gerechnet. In dieser Unterregion finden sich mancherlei äthiopische Beimischungen, im Osten auch orientalische. Eine dritte Unterregion bildet das zentrale Hochland von Innerasien, in dem Tibet eine Sonderstellung einnimmt. Besonders charakteristisch für diese Region sind die Aeluriden, Bos grunniens und Cameliden. Als letzte Unterregion ist Ostasien zu betrachten, also der nicht zur orientalischen Region gehörige nördliche Teil von China, die Mandschurei, Korea und Japan. Zahlreiche Beimischungen orientalischer Herkunft sind für diese Subregion kennzeichnend. In der westlichen Hälfte der holarktischen Region, der nearktischen Subregion wird vielfach ein kanadisches Gebiet abgetrennt, und außerdem eine sonorische Uebergangsregion, die das südlichste Nordamerika vom atlantischen bis zum stillen Ozean, das große innere Becken von Mexiko und Niederkalifornien umfaßt, und ein Mischgebiet neotropischer und nearktischer Formen darstellt.

Wir kommen nunmehr zur äthiopischen Region der Arctogaea, die ganz Afrika umfaßt und nördlich in wenig scharf bestimmter Grenze ungefähr bis zum Wendekreise reicht. Die Entwickelung dieser Region schildert Arldt folgendermaßen: In mesozoischer Zeit bildete sie mit Südamerika zusammen einen großen Kontinent, von dem aus sich eine Landbrücke über Madagaskar nach Indien erstreckte. Ueber diese Brücke hielten eine Reihe bisher ausschließlich nordischer Tierformen ihren Einzug, von denen die ersten die Region bereits in mesozoischer Zeit erreichten und daher auch noch nach Südamerika gelangen konnten. Andere gelangten dagegen erst nach Afrika, als dieses bereits von der neotropischen Region abgetrennt war. Im Eocän erfolgten neue Einwanderungen von holarktischen Typen, deren Ausgangspunkt der nearktische Kontinent war. Während der Oligocänzeit blieb Afrika und das mit ihm verbundene Madagaskar isoliert und konnte die erhaltenen Faunenelemente eigenartig weiter entwickeln; gegen Ende der Oligocänzeit trat es aber mit der holarktischen Region aufs neue vorübergehend in Verbindung, und die neuen Einwanderer drängten die ältere Fauna zurück oder vernichteten sie. Während des Bestehens dieser Brücke drangen auch einzelne Formen nach Europa vor. Im Miocän war Afrika wiederum isoliert, und Madagaskar löste sich los. Im Pliocän entstand eine auch für Waldtiere gangbare Verbindung mit Indien und die dortige reiche Tierwelt verbreitete sich rasch in dem afrikanischen Kontinent, der gleichzeitig auch von Europa her zugänglich, und wenigstens bis zur Wüste mit holarktischen Formen bevölkert wurde. Später verschwand dann das verbindende Waldgebiet und es kam dann zur Ausbildung zahlreicher neuer Arten, besonders von Antilopen. Der äthiopischen Region fehlen Monotremen und Marsupialier gänzlich, dafür weist sie eine große Zahl endemischer Familien und Gattungen der Monodelphier auf, von denen besonders die zahlreichen Huftiere erwähnt sein mögen. Rein äthiopisch sind die Familien der Giraffen, Flußpferde, Klippschliefer, Anomaluridae, Lophiomyidae, Protelidae, Potamogalidae, Chrysochloridae. Sehr stark ist die Entwickelung der Antilopen und auch von den Equiden finden sich mehrere Vertreter. Auch Elefanten, Nashörner und das Okapi sind zu erwähnen. Von anthropoiden Affen kommen Gorilla und Schimpanse vor, von anderen Affen die Gattungen Colobus, Cercopithecus, Cynocephalus, Cercocebus, Theropithecus, von Halbaffen Galago und Perodicticus. Auffällig ist das gänzliche Fehlen von Vertretern der Familien: Ursidae, Tapiridae, Cervidae, Castoridae, Talpidae, sowie der Gattung Sus, während andere Gattungen der Familie Suidae in Afrika vertreten sind.

Die madagassische Region ist trotz der Afrika so benachbarten Lage von der äthiopischen scharf zu trennen. Die madagassische Region umfaßt außer Madagaskar die Inseln Mauritius, Bourbon und Rodriguez, die Seychellen und Comoren. Die merkwürdige Tatsache, daß ihre Säugetierfauna so verschieden von der des benachbarten afrikanischen Kontinentes ist, läßt sich durch die folgenden erdgeschichtlichen Beziehungen erklären. Im Mesozoikum bildete Madagaskar einen Teil des südatlantischen Kontinentes und war außerdem über die Seychellen und andere Inseln des indischen Ozeans mit Ceylon und Vorderindien verbunden. Am Ende der Kreidezeit verschwand diese Verbindung mit Indien, und im Tertiär wurde Madagaskar durch Abtrennung vom afrikanischen Festlande zur Insel. Jedenfalls erfolgte diese Trennung vor der Einwanderung der großen Säugetiere in Afrika, also vor der Pliocänzeit. Lydekker und Arldt nehmen an, daß die Trennung zur Miocänzeit erfolgte, Leche dagegen verlegt sie weiter zurück in das Eocän, wegen der primitiven Beschaffenheit der madagassischen Säuger. Jedenfalls konnte diese alte madagassische Säugetierwelt, wegen der frühzeitigen Isolierung der Insel, sich weiter differenzieren, während ihre auf dem afrikanischen Kontinent zurückgebliebenen Verwandten der Konkurrenz mit den neuen Einwanderern unterlagen, denen an der neugebildeten, im Laufe der Erdgeschichte immer breiter werdenden Meeresstraße zwischen Afrika und Madagaskar ein Halt geboten wurde. Nur wenige Formen vermochten die zuerst noch schmale Meeresstraße zu überqueren. So ist es zu erklären, daß nicht weniger wie 25 Säugetiergattungen ausschließlich auf Madagaskar vorkommen und nur 3 weitere auch in Afrika.

Ganz charakteristisch ist die starke Entwickelung der Halbaffen in zahlreichen auf die Region beschränkten Gattungen. Von Raubtieren kommen nur einige zibetkatzenartige und mangustenartige Tiere vor, die aber zu besonderen Gattungen gehören. Ferner ist Madagaskar die Heimat der Centetidae und einiger anderer Insektivoren. Auch die Nagetiere Madagaskars gehören zu einer endemischen Familie, den Nesomyidae. Dagegen fehlen Madagaskar die Affen, und von Ungulaten ist nur Potamochoerus vorhanden, der als guter Schwimmer jedenfalls von Afrika herübergekommen ist, als der trennende Meeresarm noch nicht so breit war wie jetzt. Auch das Flußpferd hat auf diesem Wege Madagaskar erreicht, ist aber dort im Pleistocän ausgestorben.

Die vierte Region der Arctogaea ist die orientalische. Sie umfaßt die südlich der holarktischen Südgrenze liegenden Gebiete Asiens, sowie die vorgelagerten Inseln, Ceylon, die großen Sundainseln, die Philippinen, Formosa und viele kleinere Inseln. Im Osten tritt ein indoaustralisches Uebergangsgebiet auf, in welchem die Fauna der orientalischen und der australischen Region sich allmählich durchdringen, ohne daß eine Grenze zu ziehen wäre. Die von Wallace seinerzeit gezogene Grenzlinie, die beide Regionen scheiden sollte, und welche zwischen Borneo und Celebes sowie Bali und Lombok hindurchführte, ist aufzugeben. Da die topographischen Verschiedenheiten der orientalischen Region sehr groß sind, ist auch die Fauna in den verschiedenen Teilen dieser Region großen Verschiedenheiten unterworfen. Auch hat sie in früheren Erdperioden nicht ein einheitliches Ganzes gebildet, sondern ist aus verschiedenartigen Bruchstücken zusammengesetzt, die in Beziehungen zu benachbarten tiergeographischen Regionen gestanden haben. Es werden daher eine Anzahl Unterregionen unterschieden. Die erste ist nach Arldt Ceylon mit Südindien, die zweite das festländische Vorderindien, die dritte Hinterindien mit Südchina und Formosa, aber ohne Malakka, die vierte die indomalaiische, die fünfte die philippinische und die sechste Celebes und die Molukken. Andere Forscher nehmen eine etwas andere Einteilung an. So wird vielfach die indomalaiische Unterregion mit Celebes und den Molukken zusammen als indoaustralisches Uebergangsgebiet aufgefaßt. Zur Kreidezeit verbanden ausgedehnte Landmassen Asien und Australien, und alte asiatische Formen konnten dadurch nach Australien gelangen, aber noch vor der Tertiärzeit ist die Isolierung Australiens erfolgt. Zur Eocänzeit lag ein großer Teil des heutigen indoaustralischen Archipels unter Wasser und erst im Miocän tauchten neue Landmassen wieder auf, so vor allem Celebes. Die altertümlichen Säugetiere, die auf Celebes vorkommen, sind damals von Java (P. und F. Sarasin), vielleicht auch von den Philippinen (M. Weber) her eingewandert. Im Miocän hatten sich auch die anderen großen Sundainseln zu einer gemeinsamen, mit Asien zusammenhängenden Landmasse verbunden und wurden von dort aus bevölkert. Borneo und Celebes blieben aber durch die Makassarstraße getrennt, und die Molukken standen mit Neu-Guinea in Verbindung, das seinerseits mit Australien eine einheitliche Landmasse bildete. Auch im Pliocän treten ausgedehnte Landverbindungen ein, und es war der Archipel damals in eine westliche und eine östliche Landmasse geschieden. Zahlreiche Säugetiere drangen von Asien her in das indomalaische Gebiet ein, dann lösten sich die Landverbindungen mehr und mehr und endlich erfolgte die Abtrennung Javas, dann Borneos und zuletzt die Loslösung Sumatras von Malakka. Ebenfalls sehr spät trennte sich Neu-Guinea von Australien. Auf Grund dieser hier skizzierten erdgeschichtlichen Entwickelung eröffnet sich ein Verständnis für die jetzige Verbreitung der Säugetiere im malaiischen Archipel, die von Westen her vorgedrungene asiatische Einwanderer, von Osten her australische Einwanderer sind. Die anderen Unterregionen des orientalischen Gebietes sind erdgeschichtlich weniger erforscht. Aber auch mit der holarktischen und mit der äthiopischen und madagassischen Region sind Zusammenhänge anzunehmen. Die der orientalischen Region ausschließlich angehörigen Säugetiere sind daher nicht sehr zahlreich. Durch die in der Miocänzeit vorhandene Verbindung Indiens mit dem holarktischen Gebiete drangen Vertreter zahlreicher nordischer Familien in die orientalische Region ein. Als dann Vorderindien durch die Entstehung der großen Faltengebirge vom Norden isoliert wurde, konnten holarktische Einwanderer nur noch nach Hinterindien vordringen. Im Pliocän war Indien auch mit dem tropischen Afrika verbunden,

vielleicht durch eine südlich von Arabien führende Landbrücke. Diese jedenfalls zum großen Teil waldbedeckte Landverbindung gestattete einen Austausch beider Faunen, wobei allerdings Afrika den größten Anteil erhielt.

Da die orientalische Region in langdauernder Verbindung mit den benachbarten Regionen gestanden hat, ist die Zahl der ihr eigentümlichen Gattungen von Säugetieren relativ gering. Nur 3 Familien sind ausschließlich orientalisch: die Galeopithecidae, Tupajidae und Tarsiidae. Von anthropoiden Affen finden sich Orang-Utan und Gibbon, von anderen Affen die Gattungen Macacus, Semnopithecus und Nasalis, von Halbaffen außer der oben erwähnten Familie der Tarsiidae noch Nycticebus und Loris. Außer den rein orientalischen Tupajidae kommen von Insektivoren noch die Gattungen Gymnura, Halomys, Soriculus, Anurosorex und Chimarrogale vor. Unter den Carnivoren ist die Familie der Felidae sehr reich in der orientalischen Region vertreten, darunter Tiger und Löwe, auch Zibetkatzen sind viel vorhanden, ferner finden sich 3 Bärenarten und 4 Gattungen Mustelidae; die Canidae sind in einigen Gattungen vertreten, doch findet sich darunter keine einzige auf die orientalische Region beschränkte. Unter den Nagetieren erreichen die Eichhörnchen in der malaiischen Subregion eine bedeutende Entwickelung. Von Mäusen sind 11 Gattungen rein orientalisch. Auch ein paar Stachelschweingattungen (Atherura und Trichys) sind zu erwähnen, von denen die erstere auch in Westafrika einen Vertreter hat.

Unter den Huftieren ist eine Artengruppe der Gattung Bos rein orientalisch, zu denen der Gaur und der Banteng gehören. Von Ziegen ist die Gattung Hemitragus zu erwähnen; echte Antilopen haben nur wenig Vertreter, im Gegensatz zur äthiopischen Region, dagegen kommen zahlreiche Cerviden in der orientalischen Region vor, ferner die Gattung Tragulus. Groß ist die Zahl der echten Schweine in der orientalischen Region. Von Nashörnern finden sich 3 lebende Vertreter, von Tapiren eine Art (Tapirus indicus), ferner der indische Elefant. Auch die Schuppentiere sind in der orientalischen Region vertreten.

Schließlich seien einige Worte der Verbreitung der **marinen Säugetiere** gewidmet. Vier Ordnungen kommen in Betracht: die Pinnipedier, Sirenen, Zahnwale und Bartenwale. Von diesen sind die beiden ersten Ordnungen noch mehr oder weniger von den Küsten abhängig, die beiden anderen dagegen, wenigstens zum Teil Hochseebewohner. Die **Pinnipedier** sind vorwiegend in den gemäßigten und kälteren Teilen des Weltmeeres verbreitet, ein paar Formen kommen aber auch in Süßwasserseen vor, so die Phoca caspica im Kaspischen und Aralsee, die Phoca sibirica im Baikal- und Oronsee. Von den 3 Familien der Pinnipedier sind die Ohrenrobben (Otariidae) im wesentlichen auf die südliche Hemisphäre beschränkt, dringen aber längs der amerikanischen Westküste bis zum Beringsmeer vor. Die zweite Familie ist die der Walrosse, arktisch und zirkumpolar. Die dritte Familie der Seehunde (Phocidae) ist mehr kosmopolitisch, in den warmen Gebieten allerdings fast fehlend, bis auf eine Gattung des Mittelmeeres, der Kanarischen Inseln und der Antillen (Monachus).

Die Verbreitung der **Sirenen** ist ebenfalls an die Meeresküsten, zum Teil an die Flüsse gebunden. So kommt die Gattung Manatus in den Flüssen und Flußmündungen der Ostküste des tropischen Amerika vor, in einer besonderen Art auch in den Flüssen der Westküste des tropischen Afrika. Halicore ist dagegen marin und findet sich vom Roten Meere bis zur Straße von Mozambique und bis nach Australien und den Philippinen.

Unter den **Zahnwalen** gibt es ein paar auch in ihrem Bau manche primitive Merkmale zeigende Formen, die ausschließlich in Flüssen leben, wie der Gangesdelphin (Platanista gangetica) und Inia aus dem Gebiete des oberen Amazonenstromes. Andere halten sich sowohl in Flüssen wie in deren Mündungen sowie an den Meeresküsten auf, so Phocaena, Sotalia, Orcella u. a. und eine große Zahl bewohnt ausschließlich das Meer. Unter diesen trifft man Arten wie den Delphin (Delphinus delphis) oft in großen Scharen vereint auch auf hoher See und andere, wie die tintenfischfressenden Zahnwale sind fast ausschließlich Hochseebewohner, so der Dögling (Hyperoodon rostratus) und der Spermwal (Physeter macrocephalus). Letzterer ist nahezu kosmopolitisch und fehlt nur den polaren Gewässern. Nahezu kosmopolitisch sind auch Grindwal (Globiocephalus melas) und der räuberische Schwertwal (Orcinus orca). Ausschließlich auf die arktischen Gewässer beschränkt sind nur Weißwal (Beluga leucas) und Narwal (Monodon monocerus).

Die **Bartenwale** leben ausschließlich im Meere, und die große Mehrzahl ihrer Arten ist nahezu kosmopolitisch verbreitet, so die meisten Furchenwale. Sie kommen in identischen oder nahezu identischen Arten sowohl auf der nördlichen wie auf der südlichen Halbkugel vor, und sowohl im atlantischen wie im pazifischen Ozean, nördlich und südlich bis in die polaren Gewässer vordringend. Allerdings scheinen einzelne Arten in geographisch lokalisierte Stämme geschieden zu sein, von denen ein jeder seinen bestimmten Verbreitungsbezirk hat, innerhalb dessen die nach den Jahreszeiten regulierten Wanderungen vor sich gehen.

Von den Glattwalen ist nur der dem Aussterben nahe Grönlandswal auf die hocharktischen Gewässer lokalisiert, der Nordkaper (Eubalaena glacialis) dagegen, der im nordatlantischen Ozean fast völlig ausgerottet ist, kommt auch auf der südlichen Hemisphäre vor, früher als Balaena australis

bezeichnet, und auch die japanische Eubalaena japonica dürfte damit identisch sein, so daß auch diese Form nahezu kosmopolitisch ist, nur mit Ausschluß der polaren Gewässer. Ein zwischen beiden Familien stehender Wal, der Grauwal (Rhachianectes glaucus) ist auf den nordpazifischen Ozean beschränkt. Wenn die Zeit der Geburt herannaht, begeben sich die Weibchen mancher Bartenwalarten nahe an die Küste in ruhige seichte Gewässer, sonst sind sie völlig von dem Lande unabhängig, und ihre Verbreitung regelt sich vor allem nach dem Vorhandensein ihrer aus Plankton bestehenden Nahrung.

Literatur. **F. E. Beddard,** *Mammalia, in: The Cambridge Natural History. London 1902.* — **E. Bresslau,** *Der Mammarapparat, in: Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte, Bd. 19, 1909.* — **G. E. Dobson,** *A monograph of the Insectivora. London 1883 bis 1900.* — **Ellenberger und Baum,** *Handbuch der vergl. Anatomie der Haustiere. Berlin 1908.* — **W. Flower and H. Gadow,** *An Introduction to the osteology of the Mammalia. London 1885.* — **W. Flower and R. Lydekker,** *An Introduction to the study of Mammals living and extinct. London 1891.* — **E. Gaupp,** *Die Verwandtschaftsbeziehungen der Säuger, vom Standpunkte der Schädelmorphologie aus erörtert. Verhandl. des VIII. Internationalen Zoologen-Kongresses zu Graz. Jena 1911.* — **C. Gegenbaur,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Leipzig 1898.* — **U. Gerhardt,** *Das Kaninchen. Leipzig 1911.* — **Derselbe,** *Zur Morphologie der Säugetierniere. Verhandlungen der deutschen Zoologischen Gesellschaft, 1911.* — **Giebel, Leche, Göppert,** *Säugetiere, in: Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs. Leipzig 1874 (noch unvollständig).* — **L. Heck,** *Säugetiere in Brehms Tierleben (im Erscheinen begriffen).* — **C. Keller,** *Die Abstammung der ältesten Haustiere. Zürich 1902.* — **W. Kükenthal,** *Vergl. anatomische und entwickelungsgeschichtliche Untersuchungen an Waltieren. Jena 1889 und 1893.* — **Derselbe,** *Vergl. anatomische und entwickelungsgeschichtliche Untersuchungen an Sirenen. Jena 1897.* — **Derselbe,** *Ueber die Anpassung von Säugetieren an das Leben im Wasser. Zool. Jahrbuch, Abt. Systematik, Bd. 5. Jena 1890.* — **W. Leche,** *Studien über die Entwickelung des Zahnsystems bei den Säugetieren. Zoologica, 1895, 1902 und 1907.* — **R. Lydekker,** *Handbook to the Marsupialia and Monotremata. London 1894.* — **Derselbe,** *Handbook to the Carnivora. London 1895.* — **W. O. Matthew,** *The arboreal ancestry of the Mammalia. American Naturalist, Vol. 38, 1904.* — **W. L. and P. L. Sclater,** *The Geography of Mammals. London 1899.* — **Sclater and O. Thomas,** *The book of Antelopes. London 1894 bis 1900.* — **E. L. Trouessart,** *Catalogus Mammalium. Berlin 1898 bis 1899.* — **T. Tullberg,** *System der Nagetiere. Upsala 1899.* — **M. Weber,** *Die Säugetiere. Jena 1904.* — **R. Wiedersheim,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. Jena 1909.*

W. Kükenthal.

Säugetiere.

Paläontologie.

1. Einleitung. Erhaltungszustand der fossilen Säugetiere. 2. Das Verhältnis der Paläontologie zur Systematik. 3. Einige der wichtigsten Spezialisationen im Laufe der Stammesgeschichte der Säugetiere. 4. Die wichtigsten Fundorte größerer Säugetierformen. 5. Systematische Uebersicht der 2 Unterklassen und 23 Ordnungen der Säugetiere. 6. Systematik und Stammesgeschichte der fossilen Säugetiere.

1. Einleitung. Erhaltungszustand der fossilen Säugetiere.

Die Kenntnis der fossilen Säugetiere beschränkt sich fast ausschließlich auf die der Zerstörung trotzenden Hartteile, also auf das Skelett und Gebiß. Nur in sehr seltenen Fällen sind auch Weichteile, Muskeln, Sehnen, Haut, Haare usw. erhalten (die in Eis eingefrorenen Kadaver von Mammut, Rhinoceros (Coelodonta) Mercki und Rh. (C.) antiquitatis im sibirischen Landeis; die in Erdwachs erhaltenen Leichen von Mammut und Nashorn aus Starunia in Galizien; die Fellreste von Grypotherium aus argentinischen Höhlen usw.). Einen Aufschluß über die Körpergestalt der eiszeitlichen Säugetiere erhalten wir durch die sehr charakteristischen Zeichnungen und Skulpturen des Eiszeitmenschen. Diese Fälle sind jedoch so vereinzelt, daß sie bei der überwiegenden Mehrzahl der nur durch Knochen oder Zähne bekannten Säugetiere nicht ins Gewicht fallen.

Von der Mehrzahl der fossilen Säugetierarten sind nur Kieferstücke mit Zähnen oder isolierte Zähne bekannt. Da aber die Spezialisation des Gebisses bei den Säugetieren außerordentlich verschiedene Wege eingeschlagen hat und die Zahnformen der Säugetiere für die einzelnen Arten, Gattungen, Familien usw. sehr bezeichnend sind, so sind wir in der Lage, auch derartige dürftige Reste mit den besser erhaltenen zu einem geschlossenen Gesamtbild vereinigen zu können. Die schrittweise Spezialisation, die uns an den Zähnen entweder in der Reduktion ihrer Zahl oder in der Komplikation ihres Kronenbaues entgegentritt, setzt uns in die Lage, einen Einblick in die Geschichte der Säugetierstämme zu erhalten, der uns bei dem Fehlen der fossilen Gebisse unmöglich wäre, weil die übrigen Hartteile des Körpers in geschlossenen Stämmen keine so durchgreifenden Veränderungen wie das Gebiß aufweisen. Wir sind zwar in der Lage, z. B. die schrittweise Reduktion der Seitenzehen bei den fossilen Equiden und in anderen Gruppen zu verfolgen, aber mit wenigen Ausnahmen wären wir bei dem Vorhandensein solcher Skelettreste allein kaum in der Lage, die Geschichte der Familien so klar zu übersehen, wie auf Grund der Vergleiche des Gebisses der fossilen Formen.

Die Erhaltung der Knochen ist durch die Umstände des Todes und des Fossilisationsprozesses bedingt. Wo eine ganze Fauna durch Katastrophen vernichtet und von vulkanischen Aschen, Flußschlamm u. dgl. umhüllt wurde, treffen wir die Skelettelemente in relativ ungestörter Lage an. Anders liegt der Fall, wenn die verwesenden Kadaver in der Meeresbrandung gewälzt und zertrümmert wurden oder wenn Aasfresser die einzelnen Leichenteile verschlepp-

ten. Dann liegen eben nur isolierte Bruchstücke vor, die oft die einzigen bekannten Überreste des fossilen Tieres bilden. Die genaue Kenntnis der alttertiären nordamerikanischen Säugetiere ist durch die Vernichtung größerer Faunen bei vulkanischen Eruptionen bedingt (ebenso die Fauna von Santa Cruz in Patagonien, die Fauna von Samos, die Fauna von Trinil auf Java, die Fauna von Antisirabé auf Madagaskar usw.). Am unvollständigsten sind in der Regel die Säugetiere in marinen Bildungen erhalten, wo intakte Skelette zu den größten Seltenheiten gehören (z. B. die Sirenen aus dem Eozän Aegyptens, die Wale aus dem Miozän von Antwerpen usf., welche meist stark durcheinandergeworfene Skelettreste von Kadavern darstellen, die lange von der Brandung gerollt wurden). Günstiger liegen die Erhaltungsbedingungen im Quartär; die in Höhlen oder im Löß gefundenen Skelette sind mitunter fast vollständig erhalten.

Die Knochensubstanz leistet der mechanischen Zerstörung vor der Einbettung in das schützende Gestein Widerstand. Fast unzerstörbar ist der Schmelz der Zähne, woraus sich die Erhaltung so vieler Zähne auch dort erklärt, wo die Knochen sehr mürbe sind und bei unkundiger Ausgrabung zerbröckeln, wie dies häufig in lockeren Sanden der Fall ist. Die Farbe der fossilen Knochen ist durch die chemische Beschaffenheit des umhüllenden Gesteins bedingt. In Sanden, Sandsteinen und Konglomeraten sind die Knochen hellgelb bis dunkelbraun und meist rostfarbig getont, in hellen Lehmen sind die Knochen hellgelb, mitunter sogar fast weiß, in vulkanischen Tuffen sind sie manchmal dunkel, in blaugrauen oder grünlichen Tonen fast immer dunkelbraun bis tiefschwarz gefärbt. Knochen und Zähne aus Gesteinen, die viel Terra rossa enthalten (z. B. die quartären Knochenbreccien des österreichischen Küstenlandes, die roten Tone von Pikermi usw.) besitzen einen weißen Grundton mit schwarzen, rostroten und braunen Flecken. Knochen und Zähne, die aus Braunkohlen oder schwefelkiesreichen Tonen stammen (z. B. Congerientegel des Wiener Beckens), ebenso aus dunklen Sanden (schwarze Pectunculus-Sande von Antwerpen), sind häufig von Pyrit durchsetzt oder mit Pyritinkrustationen bedeckt, die bei der Zersetzung an der Luft den Knochen zerstören. Die fossilen Knochen müssen für die Aufbewahrung in Museen dadurch gefestigt werden, daß man sie entweder in einer Leimlösung kocht oder, wo das nicht tunlich ist, mit einer dünnen Schichte von Schellack überzieht (Lösung in Alkohol). Als Klebemittel hat sich Fischleim am besten bewährt.

2. Das Verhältnis der Paläontologie zur Systematik.

Durch die reichen Funde fossiler Säugetiere sind die Kenntnisse von der Geschichte der fossilen Säugetiere außerordentlich erweitert worden. Da aber die Systematik der Säugetiere die lebenden Gattungen und Arten zur Grundlage hat, die ja größtenteils hoch spezialisiert sind, so ist es notwendig geworden, bei der Einreihung der fossilen Formen in die bestehenden systematischen Kategorien wie Unterfamilien, Familien, Unterordnungen usf. die Diagnosen dieser Kategorien abzuändern, beziehungsweise zu erweitern.

Man hat nun zwei verschiedene Wege eingeschlagen, um die aus den fossilen Formen gewonnenen Erfahrungen mit der Systematik der modernen Säugetiere in Einklang zu bringen. Die einen betrachten die Diagnose der lebenden Familien als etwas Starres und versuchen, durch Errichtung neuer Untergruppen die fossilen Formen dem alten Schema einzufügen. Die anderen versuchen die Diagnosen der Gattungen, Familien uws. abzuändern und einen genetischen Gesichtspunkt in die Diagnosen zu tragen.

Nehmen wir das Beispiel der Physeteridae (Pottwale). Heute lebt nur noch der Pottwal (Physeter) und eine zweite Gattung, Kogia. Beiden fehlen funktionelle Zähne im Oberkiefer gänzlich. Als nun fossile Pottwale bekannt wurden, deren Zwischenkiefer und Oberkiefer bezahnt war, so hatte man zwei Wege: entweder die alte Diagnose der Physeteridae aufrecht zu erhalten und für die neu bekannt gewordenen fossilen Typen (z. B. Scaldicetus, Physeterula) eine neue systematische Kategorie zu errichten (z. B. eine „Subfamilie“, ein sehr beliebter Vorgang), oder aber die Diagnose der Physeteriden genetisch zu fassen und hervorzuheben, daß die primitiveren Formen nicht nur Unterkieferzähne besaßen, sondern auch im Zwischen- und Oberkiefer Zähne tragen. Keinesfalls konnte der Vorgang richtig sein, den z. B. Zittel in seinem Handbuche der Paläozoologie (V. Bd., 1893, S. 176) vertrat, wo die alte Diagnose der Physeteriden aufrecht erhalten blieb und die fossilen Gattungen einfach eingereiht wurden. Immerhin aber war dieser Weg, die fossilen Formen dem System der lebenden Mammalia einzuschachteln, richtiger als der Vorgang, sich aus der Schwierigkeit durch Neuschaffung systematischer Kategorien zu helfen. Daß ein solcher Weg nur zu einer ganz verkehrten und unrichtigen Systematik führt, zeigt z. B. die Teilung der Cameliden in die „Unterfamilien“ der Leptotragulinae, Poëbrotheriinae, Protolabinae und Camelinae, die nur verschiedenen Entwicklungsstufen eines und desselben geschlossenen Stammes entsprechen. Das Gleiche gilt für die Equiden, bei denen die „Unterfamilien“ der Hyracotheriinae, Palaeotheriinae, Anchitheriinae und Equinae errichtet wurden und diese Beispiele ließen sich noch erheblich vermehren. Gerade hier kommt klar zum Vorschein, daß die systematischen Kategorien, aufgebaut auf den lebenden Formen, eigentlich nur einen Querschnitt durch die Stammreihen darstellten und daß es sehr schwer ist, die vertikale Entwickelung der Stammesreihen in der heute üblichen Form der Systematik zum Ausdrucke zu bringen.

Kann man aber diesem Uebelstande noch dadurch begegnen, daß die Diagnosen der Familien genetisch gefaßt werden und die Merkmale der primitiveren Gattungen jener der spezialisierteren gegenübergestellt werden, so tritt uns dann eine außerordentliche Schwierigkeit entgegen, wenn wir in der Systematik zum Ausdrucke bringen wollen, daß zwei oder mehrere Familien in einer gemeinsamen Wurzel zusammenlaufen.

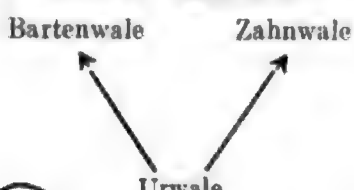
Wir wissen heute, daß die Huftiere oder Ungulaten aus einer gemeinsamen Wurzel entsprossen sind. Die Gattungen, welche den Ausgangspunkt der einzelnen jüngeren Stämme

oder Familien bilden, stehen sich jedoch untereinander sehr nahe und es ist ein Bedürfnis, diese primitiven Formen zu einer einheitlichen systematischen Kategorie zusammenzufassen. Dies ist denn auch geschehen, aber, wie es scheint, ist die Art der Durchführung eine sehr unglückliche gewesen. Man hat sich dadurch zu helfen geglaubt, daß man für die alten Formen, welche die Wurzeln der einzelnen Familien darstellen, zunächst eigene Familien errichtete und diese Familien dann zu einer „Unterordnung" Condylarthra vereinigte. Der Zoologe, der die Phylogenie der einzelnen Stämme nicht in der gleichen Weise wie der Paläozoologe zu überblicken vermag, muß durch diese Methode zur Vorstellung geführt werden, daß die „Unterordnung" der Condylarthra der „Unterordnung" der Perissodaktylen, der „Unterordnung" der Litopterna usw. gleichwertig sei, was ja nicht der Fall sein kann.

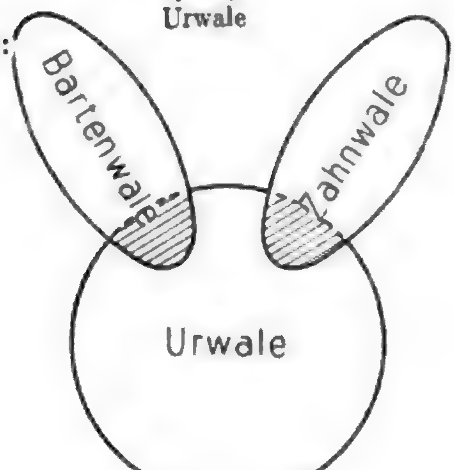
Ganz das Gleiche sehen wir bei den Cetaceen. Seit durch den Fund eines bezahnten Bartenwals im Oberoligozän Oberröstereichs († Patriocetus) die Herkunft der Bartenwale von den Archaeoceten festgestellt ist, ebenso wie die Herkunft der Zahnwale über † Agorophius von den Archaeoceten, können diese nicht mehr als gleichwertige „Unterordnung" der Cetaceen neben den Mystacoceten und Odontoceten betrachtet werden.

Je nach den verschiedenen Auffassungen der einzelnen Autoren werden Gattungen wie Agorophius und Patriocetus unter den Cetaceen, Notoprotogonia, Ricardolydekkeria, Tetraclaenodon, Mioclaenus u. s. f. unter den Ungulaten sehr verschieden bewertet und einmal den Familien, deren Wurzelgattungen sie darstellen, ein andermal der „Unterordnung" eingereiht, welche als die primitivste der Ordnung gilt.

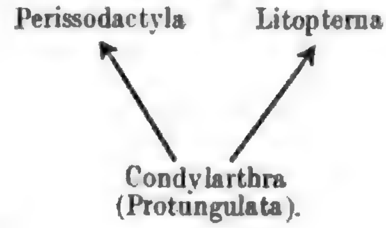
Diese Zustände der Systematik der fossilen Säugetiere lassen sich einstweilen dadurch verbessern, daß man Gruppen wie die Archaeoceti, Protungulata, Pseudolemuroidini mit den Palaeopithecini, die Creodonta usw. als „Stammgruppen" den aus ihnen hervorgegangenen Ordnungen oder Familien gegenüberstellt. Auf diese Weise wird klar zum Ausdruck gebracht, daß die Abgrenzung der Stammgruppe von den aus ihr divergierenden Stämmen eine künstliche ist und einer Uebereinkunft unterliegt. Graphisch wird man also nicht darstellen:



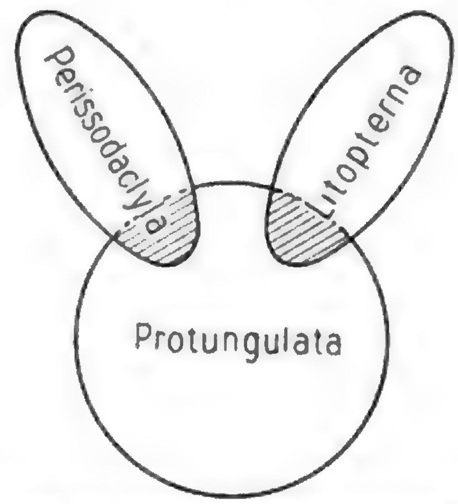
sondern:



so daß auch graphisch zum Ausdruck gebracht wird, daß die Unterenden der Mystacoceti und Odontoceti in den Kreis der Formen fallen, die in ihrer Gesamtheit als Archaeoceti zu betrachten sind. Ebenso würden wir nicht darstellen:



sondern:



Wenn sich aber auch in dieser Form ein Ausweg findet, um die Ergebnisse der phylogenetischen Forschung mit der Systematik halbwegs in Einklang zu bringen, so ist doch nicht zu verkennen, daß sich die Schwierigkeiten eines solchen Kompromisses in dem Maße steigern werden, als unsere Untersuchungen in die Geschichte und Radiation der einzelnen Säugetierstämme Licht bringen und es ist schon jetzt das System der Säugetiere kein klares und übersichtliches Bild der Stammesgeschichte der Säugetiere, da wir z. B. größere systematische Kategorien, wie z. B. Insectivoren, Primaten, Carnivoren, Cetaceen, Ungulaten, die in einer gemeinsamen Wurzel zusammenlaufen, doch künstlich auseinanderreißen und als eigene „Ordnungen" fassen müssen. Es tritt klar hervor, daß wir endlich einen Punkt erreichen werden, wo die Ergebnisse der Phylogenie in der Systematik nicht mehr zum Ausdruck gebracht werden können.

3. Einige der wichtigsten Spezialisationen im Laufe der Stammesgeschichte der Säugetiere.

Primitiv ⟶ spezialisiert

I. Körpergröße.

klein, (Spitzmausgröße bei den ältesten Gattungen)	→	im Laufe der Entwickelung stetig zunehmend.

II. Nahrungsweise.

ursprünglich insectivor	→	daraus abgeleitet: carnivor (z. B. Wolf), omnivor (z. B. Bär), herbivor (z. B. Pferd), myrmecophag (z. B. Myrmecophaga), ichthyophag (z. B. Del-

	phin), planktonophag (z. B. Grönlandwal), sowie die sekundären Veränderungen der Nahrungsweise (z. B. Thylacoleo, von herbivoren Beutlern abstammend, sekundär carnivor geworden).

III. Bewegungsarten.

ursprünglich Klettern (bei arboricoler Lebensweise), Daumen und Großzehe opponierbar	→	Greifzangenklettern (z. B. Phalanger), Schwingklettern (z. B. Gibbon), Schreiten (z. B. Beutelwolf), Laufen (z. B. Gazelle), Springen (z. B. Springmaus), Fliegen (z. B. Fledermaus), Schwimmen (z. B. Delphin), Graben (z. B. Maulwurf), sowie die sekundären Veränderungen der Bewegungsart (z. B. Hängeklettern der Faultiere; Springen der Känguruhs, die von Greifzangenkletterern abstammen; arboricoles Klettern der Baumkänguruhs, die zum zweitenmal arboricol geworden sind usw).

IV. Skelettelemente.

A. Schädel.

Hirnkapsel klein, schmal	→	Hirnkapsel breit, gewölbt
Schnauze lang	→	Schnauze verkürzt (z. B. Affe)
Nasenlöcher am Vorderende der Schnauze	→	Nasenlöcher nach oben oder hinten verschoben (z. B. Macrauchenia, Delphin)
Knochen durch Nähte getrennt	→	Knochen coossifiziert (z. B. Mensch, Hinterhaupt)
Jochbogen geschlossen	→	Jochbogen rudimentär (z. B. Delphin)
Augenhöhle hinten offen, von der Schläfengrube nicht getrennt	→	Augenhöhlen hinten durch Knochenspange, später durch Wand abgeschlossen (z. B. echte Affen)
Stirnbeine ohne Luftzellen	→	Stirnbeine mit Luftzellen (z. B. Elefant)
Schädeldach ohne Protuberanzen		Schädeldach mit Protuberanzen, später mit Geweihen (z. B. Giraffe, Hirsch)
Tympanicum unten offen, ringförmig, frei	→	Tympanicum als geschlossener Knochenring, später aufgeblasen, mit dem Perioticum verwachsen (z. B. Fuchs, Wal)
Unterkiefer in der Symphyse durch Ligament verbunden	→	Unterkiefer in der Symphyse verschmolzen (z. B. Pferd)
Schädelprofil niedrig	→	Schädelprofil hoch
Schädeldach gerade		Schädeldach nach hinten oben ansteigend

B. Wirbel.

7 Halswirbel	→	Entweder auf 6 reduziert (Manatus, Choloepus) oder vermehrt (Bradypus mit 9 Halswirbeln)
alle Halswirbel frei	→	einige oder alle verschmolzen (z. B. Delphin, Balaena)
alle Brust- und Lendenwirbel frei	→	fest verschmolzen (z. B. Glyptodon)
Schwanz lang	→	Schwanz verkürzt (z. B. Bär, Phoca) bis rudimentär (z. B. Gorilla)
Wirbelepiphysen vorhanden	→	Wirbelepiphysen rudimentär (z. B. Metaxytherium)

C. Gliedmaßen.

Hand und Fuß fünfzehig	→	Finger- und Zehenzahl verringert (z. B. Nashorn, Pferd)
Daumen und Großzehe opponierbar	→	Daumen- und Großzehe nicht opponierbar
Phalangenzahl in Hand und Fuß (mit Ausnahme von Daumen und Großzehe mit 2 Phal.) drei für jede Zehe	→	Phalangenzahl verkürzt bei Reduktionen oder vermehrt bei Verlängerung der Finger in Flossen (z. B. Globiocephalus)
Schlüsselbein vorhanden	→	Schlüsselbein verloren (bei Ungulaten, den meisten Carnivoren und allen Cetaceen)
Vorderarm mit Elle und Speiche	→	Vorderarm mit reduzierter Elle (z. B. Pferd, Gazelle)
Unterschenkel mit Schienbein und Wadenbein	→	Unterschenkel mit reduziertem Wadenbein (z. B. Pferd, Gazelle)
Alle Carpalia frei	→	zwei oder mehr Carpalia verschmolzen (z. B. Bos)
Alle Tarsalia frei	→	zwei oder mehr Tarsalia verschmolzen (z. B. Hyomoschus)
Metapodien getrennt	→	Mittlere Metapodien zu einem Kanonenbein verschmolzen (z. B. Giraffe, Hirsch)
Krallen vorhanden	→	Krallen verloren (z. B. Wale, Seekühe)

4. Die wichtigsten Fundorte größerer Säugetierfaunen.

Die Funde mesozoischer Säugetiere sind überaus selten und man kennt bis jetzt keinen Fundort, an dem größere Mengen fossiler Säugetierreste entdeckt worden wären. Seit den letzten wichtigen Funden von kleinen Säugetierkiefern und Zähnen im Jura Englands und Nordamerikas sind viele Jahrzehnte verflossen. Somit sind in

der folgenden Zusammenstellung nur die Fundorte berücksichtigt, an denen große Mengen von Säugetierresten gefunden worden sind oder noch gefunden werden.

Europa. Eine reiche Untereozänfauna ist von Lemoine bei Cernays in der Nähe von Reims (Frankreich) entdeckt worden. Das europäische Eozän läßt sich nicht im entferntesten mit den überaus fossilreichen Fundplätzen in Nordamerika vergleichen. Verhältnismäßig ergiebig waren die Bohnerz führenden Spalten in den Jurakalken der Schweiz und Schwabens; seit jedoch die meisten Steinbrüche und Gruben außer Betrieb gesetzt sind, fließen die neuen Funde nur sehr spärlich. Mit Ausnahme der vom Baseler Museum fortgesetzten Grabungen in Egerkingen (Schweiz) werden heute fast an keinem Fundorte größere Mengen fossiler Reste zutage gefördert.

Auch die seinerzeit so ergiebig gewesenen Gipsgruben des Montmartre (oberstes Eozän), die Cuvier den Grundstock für seine grundlegenden „Recherches sur les ossemens fossiles" lieferten, sind längst außer Betrieb und als Fundort zu streichen. Die mitteleozänen Fundstellen Europas haben bis heute nirgends eine größere Fauna geliefert. Am reichhaltigsten ist das französische Alttertiär an Säugetierresten. Die Oligozänbildungen Europas sind gleichfalls arm an Resten; am reichsten sind noch die aquitanischen Bildungen, doch sind die Funde durchaus vereinzelt. Zu den reicheren Fundstellen gehören die mitteloligozänen Meeressande des Mainzer Beckens mit zahlreichen Resten von Halitherium Schinzi.

Die gleichen Verhältnisse herrschen im Miozän. Da und dort werden in den verschiedensten Ablagerungen dieser Zeit Funde von Säugetierresten gemacht; wo diese jedoch in marinen Bildungen liegen, sind die Skeletteile meist stark zerbrochen und isoliert, so daß vollständigere Reste aus dieser Zeit in Europa zu den größten Seltenheiten gehören. Reichere Fundorte liegen in Steiermark (Göriach, Eibiswald); im Miozän Europas ist der reichste Fundort von fossilen Cetaceen, der bis heute bekannt ist, Antwerpen in Belgien. Hier sind in den schwarzen Meeressanden des Obermiozäns (Bolderien) tausende von Walleichen begraben, von denen ungeheure Mengen anläßlich der Fortifikationsarbeiten 1861—1863 zum Vorschein kamen. Durch die neuerlich in Angriff genommene Erweiterung der Fortifikationen von Antwerpen sind neue reiche Funde zu erwarten.

Erst in den unterpliozänen Ablagerungen Europas gibt es Fundorte, die sich an Reichhaltigkeit mit den berühmtesten Fundorten Nordamerikas messen können. Der berühmteste Fundplatz von Resten aus dieser Zeit liegt bei Pikermi in Attika, dem der neuerdings entdeckte Fundort Drazi in Euboea sowie die seit längerer Zeit bekannten Fundstellen auf Samos anzureihen sind. Die in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts ergiebigen Fundstellen beim Belvedere in Wien sind teils ausgebeutet, teils durch die fortschreitende Verbauung verschlossen worden. Da und dort werden vereinzelte Funde gemacht, ohne daß derartige Funde eine sichere Aussicht auf Erfolg bei fortgesetzten Grabungen bieten würden.

Aus Frankreich sind in der Gegend von Lyon, Cucuron und Mont Lebéron (Vaucluse) ergiebigere Fundstellen unterpliozäner Säugetiere zu nennen. Ebenso ist auch Concud (Teruel) bei Lissabon eine reichere Fundstelle. Im ganzen und großen sind aber von allen diesen Fundstellen nur Zufallsfunde zu erwarten. Das gleiche gilt auch von den jüngeren Pliozänfaunen. Stellenweise (wie in Bolgardi in Ungarn) wird ein reicherer Fundplatz entdeckt, der nach der Ausbeutung aus der Liste der Quellen unserer paläontologischen Kenntnis zu streichen ist. In Antwerpen ist auch aus der Pliozänzeit ein „Walfriedhof" (mit überwiegenden Bartenwalresten) erhalten. Die oberpliozäne Säugetierfauna ist am vollständigsten aus der Auvergne und aus dem Arnotal in Toskana bekannt.

Die Plistozänbildungen Europas sind relativ sehr reich an Säugetieren, doch sind es auch hier meist Zufallsfunde und keine ständigen Fundorte. Die reichsten Funde verdanken wir Ausgrabungen in den verschiedenen Höhlen; berühmtere Fundstellen, an denen in letzter Zeit wertvolle Reste gehoben wurden, liegen in Mauer bei Heidelberg, Taubach bei Weimar, Mosbach bei Mainz; bereits ausgebeutet sind z. B. Hundsheim bei Hainburg in Niederösterreich u. v. a. Eine Kanalgrabung in Belgien hat 1910 eine sehr große Menge eiszeitlicher Säugetiere zutage gefördert; eine noch immer unerschöpfliche Fundstelle ist die submarine Doggerbank zwischen England und Deutschland.

Asien. Aus Asien fehlt uns vom Beginne der Eozänzeit bis zum Anfange der Oberoligozänzeit bis heute leider jede Kenntnis über die fossilen Säugetiere, obwohl Asien gerade in dieser Zeit eine sehr wichtige Rolle als Entwicklungszentrum zahlreicher Stämme gespielt zu haben scheint, von denen nur die Ausläufer nach Europa und Nordamerika einwanderten. Erst aus dem Oberoligozän Ostindiens sind uns Säugetierfaunen bekannt. Die oberen Narischichten der Bugti Hills und Murree Hills enthalten die Reste typischer Angehöriger der sogenannten Anthracotheriumfauna; die unteren Siwalikschichten von der Perim-Insel, von Sind, aus den Bugti Hills und von der Salt Range über die Pabbi Hills und Murree Hills bis zu den Siwalik Hills enthalten eine reiche Miozänfauna. Die mittleren und oberen Siwalikschichten, die von der Salt Range an über die Pabbi Hills bis zu den Siwalik Hills und in Burma fossilführend sind, gehören dem Pliozän an. Aus dieser Zeit kennen wir auch aus Kleinasien und Persien größere Faunen (z. B. von Maragha, Persien). Die Pliozänbildungen Chinas sind sehr reich an Resten fossiler Säugetiere, doch spielen dieselben als medizinaler Handelsartikel eine große Rolle und sind deshalb für die Wissenschaft leider meist verloren. In den letzten Jahren sind die den knochensammelnden Chinesen seit langem bekannten fossilreichen Tuffe am Kendengflusse in Java (Trinilschichten, Fundort des Pithecanthropus erectus) ausgebeutet worden und haben eine große Menge quartärer Reste geliefert.

Nordamerika. Der außerordentliche Reichtum der eozänen und oligozänen Ablagerungen Nordamerikas an Säugetieren beruht darauf, daß diese Schichten größtenteils auf ganz andere Weise zustande gekommen sind als die gleichalten in Europa. Sorgfältige petrographische Untersuchungen haben das Ergebnis geliefert, daß die Hauptmasse der Eozänbildungen des westlichen Nordamerikas vulkanischer Natur ist. Un-

geheure Tuffmassen in der Mächtigkeit von 550 m setzen die mitteleozänen Bridger Beds zusammen, ebenso sind nach Merriam (1901) die oligozänen John Day-Beds, nach Sinclair (1906) die Washakie-Beds, ferner Torrejon, Wasatch, Wind-River und Uinta aus verfestigten vulkanischen Aschen (Tuffen) aufgebaut. Diese Aschen sind die Produkte gewaltiger Eruptionen, welche sich zu verschiedenen Zeiten ereignet und dabei gleichzeitig hunderte und tausende von Tieren plötzlich vernichtet haben (Abel 1912). Diesen Katastrophen verdanken wir die Tatsache, daß z. B. im Bridger an der Basis einer mächtigen Tuffschichte (140 m mächtig) tausende von Tierleichen gefunden wurden (W. D. Matthew, 1909). Diese Eruptionen haben sich in verschiedenen Gebieten zu verschiedenen Zeiten abgespielt, so daß wir über die Faunenfolge ebensogut unterrichtet sind wie über die Faunenelemente des westlichen Nordamerikas zur Alttertiärzeit.

Die wichtigsten Fundorte der einzelnen Tertiärfaunen liegen in folgenden Gebieten (W. D. Matthew, 1909):

1. Polymastodonfauna:	San Juan Basin in Neumexiko.
2. Pantolambdafauna:	Ebenda und in Montana.
3. Coryphodonfauna:	Evanston, Black Buttes, Washakie Basin, Bighorn Valley, alle Fundorte in Wyoming; San Juan Basin, Neumexiko.
4. Lambdotheriumfauna:	Wind River Basin, Wyo.; Untere Huerfano-Beds, Colorado.
5. Orohippusfauna:	Wyoming und Colorado.
6. Uintatheriumfauna:	Wyoming (im oberen Bridger) und im Washakie Basin, Wyoming.
7. Eobasileusfauna:	Washakie Basin Wyo.; Uinta Basin, Utah.
8. Diplacodonfauna:	Uinta Basin, Utah.
9. Titanotheriumfauna:	Chadron, Süddakota und die angrenzenden Teile von Nebraska und Wyoming; Horsetail Creek in Nordost-Colorado; Pipestone Creek, Thompson Creek, usw. in Montana; Swift Current Creek, Canada.
10. Oreodonfauna:	Unterer Brule Clay in Süddakota; angrenzende Teile von Nebraska und Wyoming; Cedar Creek in Nordost-Colorado; in Südwest-Montana nur verstreute Fundorte.
11. Leptauchenia-fauna und Protocerasfauna:	Süddakota, Nebraska, Wyoming; Lower Martin Canon, Colorado; White Buttes, Nord-Dakota; Blacktail Deer Creek, Montana.
12. Diceratherium- und Promerycochoerusfauna:	John Day-Beds von Oregon.
13. Promerycochoerus und Merycochoerusfauna:	Erste Phase: Fort Logan in Montana; Harrison in Nebraska; Monroe Creek, Nebr.; Lower Rosebud-Beds, Süd-Dakota; Cañon Ferry, Montana. Zweite Phase: Laramie Peak in Wyoming; vereinzelte Fundorte in Nebraska, Süddakota und Colorado.
14. Ticholeptusfauna:	Deep River und Smith River in Montana; Pawnee Creek, Nordost-Colorado; Flint Creek, Montana; Mascall, Oregon.
15. Protohippus- und Procamelusfauna:	Fort Niobrara, Nebraska; Little White River, Süd-Dakota; Santa Fé, Neumexiko; Clarendon, Texas; Madison Valley in Montana.
16. Peracerasfauna:	Republican River, Kansas und Nebraska; Archer, Florida; Rattlesnake, Oregon.
17. Glyptotheriumfauna:	Llano Estacado, Texas.

Die Fundorte der jüngeren Faunen liegen sehr verstreut. Größere Funde sind nur an wenigen Stellen (wie in Europa namentlich in Höhlen) gemacht worden.

Südamerika. Wichtigere Fundorte tertiärer Faunen liegen an verschiedenen Stellen des Golfes San Jorge in Patagonien (Notostylopschichten, Astraponotusschichten, Pyrotheriumschichten usw.), wo die fossilführenden Schichten an der Küste ausstreichen.

Die Santa-Cruz-Fauna ist aus der Gegend von Santa Cruz und von zahlreichen anderen Fundorten bekannt und zwar liegen einige der reicheren schon in der Cordillerenregion am Fuße des kleinen Flusses Frias (N vom Fontanasee); andere Fundstellen liegen im Inneren Südpatagoniens. Die Santa-Cruz-Schichten sind ebenso wie die fossilreichen Eozänablagerungen Nordamerikas aus vulkanischen Tuffen aufgebaut (Hatcher 1903). Die Colpodonfauna ist besonders vom Coli Huapi-See gut bekannt. Ein wichtiger Fundort pliozäner Säugetiere liegt im Tarijatal in Bolivien. Am Monte Hermoso ist eine jüngere Fauna begraben, die der Plistozänzeit angehört. Die wichtigsten Fundplätze der großen Pampassäugetiere liegen im nördlichen Argentinien; einzelne Fundorte liegen in Chile, Brasilien (hier auch in Höhlen, z. B. Lagoa Santa [Minas Geraes]).

Australien. Ein wichtiger Fundplatz zahlreicher großer plistozäner Beuteltiere liegt in Südostaustralien in der Gegend des Lake Callabonna (Fundort von Diprotodon australe). Die übrigen Funde in Queensland, Neusüdwales und Victoria sind bisher vereinzelt geblieben.

Afrika. Aus Afrika waren bis in das letzte Jahrzehnt nur sehr wenige fossile Säugetiere bekannt. Erst die in großem Stile in Angriff genommenen und durch längere Zeit fortgesetzten Grabungen in Ägypten und zwar namentlich im Fayûm nördlich vom Moeris-See (Birket-el-Qurun) haben große Mengen von Resten aus den obereozänen und unteroligozänen Faunen zutage gefördert, während die Nachgrabungen in den weißen Kalken der Mokattamberge bei Kairo sehr wertvolle mitteleozäne Seesäugetierreste ge-

liefert haben (Archaeoceten und Sirenen). Die Funde jüngerer Faunenelemente sind bis jetzt Zufallsfunde geblieben, wie die Fundplätze der untermiozänen Säugetiere bei Mogara (nordwestlich von Fayûm). Etwas reichhaltiger sind die Fundstellen des Wadi Natrun (Natrontales) in Aegypten, wo eine größere Zahl mittelpliozäner Reste gefunden wurden. In Algier sind tertiäre Säugetiere nur ganz vereinzelt, dagegen plistozäne in größerer Zahl gefunden worden. Vielleicht wird die neuentdeckte Fundstelle von Karungu am Ostufer des Victoria-Nyanza-Sees, an der bisher ein primitives Dinotherium entdeckt wurde, eine weitere ergiebige Quelle für die Kenntnis der Tertiärfauna Afrikas werden, von der wir heute nur sehr lückenhaft unterrichtet sind.

Auf Madagaskar sind in den vulkanischen Tuffen von Antsirabé (Zentral-Madagaskar) und bei Tsarazaza zahlreiche quartäre Säugetiere entdeckt worden, deren Tod in ähnlicher Weise durch eine Eruptionskatastrophe erfolgt sein muß wie der Untergang vieler nordamerikanischer Eozänfaunen, der Trinilfauna auf Java und der Santa-Cruz-Fauna in Patagonien. Wir ersehen daraus, daß wir nur durch größere Katastrophen zur Kenntnis größerer Mengen von Tierleichen an einem beschränkten Platze gelangen, falls nicht zahlreiche Kadaver in ruhigen Meeresbuchten durch Strömungen zusammengeschwemmt wurden wie im Walfriedhof von Antwerpen, der im Miozän und Pliozän eine seichte, ruhige Meeresbucht bildete.

Auf Madagaskar sind auch in den Sümpfen von Ambolisatra, Ankevo, Belo und Lamboharana wertvolle Funde quartärer Säugetiere entdeckt worden. An anderen Stellen Madagaskars sind in Grotten viele Reste ausgegraben worden.

(Chronologische Uebersicht der tertiären Säugetierfaunen siehe S. 702—707.)

5. Systematische Uebersicht der 2 Unterklassen und 23 Ordnungen der Säugetiere.

I. Unterklasse: Eplacentalia. I. Ordnung: Monotremata, II. Ordnung: Marsupialia. —**II. Unterklasse: Placentalia.** I. Ordnung: Pantotheria (Trituberculata). II. Ordnung: Insectivora. III. Ordnung: Chiroptera. IV. Ordnung: Carnivora. V. Ordnung: Cetacea. VI. Ordnung: Xenarthra. VII. Ordnung: Nomarthra. VIII. Ordnung: Rodentia. — Superordnung: Ungulata. IX. Ordnung: Protungulata. X. Ordnung: Artiodactyla. XI. Ordnung: Amblypoda. XII. Ordnung: Hyracoidea. XIII. Ordnung: Embrithopoda. XIV. Ordnung: Proboscidea. XV. Ordnung: Sirenia. XVI. Ordnung: Pyrotheria. XVII. Ordnung: Notoungulata. XVIII. Ordnung: Litopterna. XIX. Ordnung: Perissodactyla. XX. Ordnung: Ancylopoda. XXI. Ordnung: Primates.

6. Systematik und Stammesgeschichte der fossilen Säugetiere.

Klasse: **Mammalia.**

I. Unterklasse: **Eplacentalia.**

1. Ordnung: Monotremata.

Fossil nur aus dem Plistozän Australiens bekannt. Diese Reste sind leider für die Phylogenie der Säugetiere bedeutungslos, da sie den lebenden Gattungen Echidna und Ornithorhynchus angehören.

2. Ordnung: Marsupialia

Die Beuteltiere, heute auf Amerika, Australien und die angrenzenden Inseln beschränkt, waren in der Tertiärzeit in Amerika bedeutend häufiger als heute und bildeten das einzige räuberische Element in der südamerikanischen Säugetierfauna bis zum Anfange der Pliozänzeit. Aus der Kreidezeit kennen wir nur wenige Reste von Beuteltieren. Aus der Jura- und Triasformation sind mehrere Gattungen bekannt, von denen einige als Ahnen der Insectivoren betrachtet werden. Schlosser unterscheidet (1911) drei Unterordnungen: Allotheria, Polyprotodontia und Diprotodontia.

† 1. Unterordnung Allotheria (= Multituberculata) (Pflanzenfressende Marsupialia).

Die ältesten Gattungen in der Trias von Südafrika (Karoo) und Europa; im oberen Jura von Europa (Purbeckschichten) und Nordamerika (Atlantosaurus Beds); in der unteren Kreide (Wealden) von Europa; in der oberen Kreide (Laramieschichten) von Nordamerika; im unteren Eozän von Europa, Nordamerika und Südamerika fast nur aus dürftigen Resten bekannt; am vollständigsten bekannt † Ptilodus.

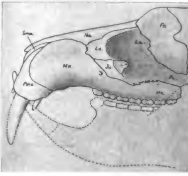


Fig. 1. †Tritylodon longaevum aus der Trias von Thaba-chou, Basutoland, Südafrika (Triasformation). Schädel von der Seite in $^2/_3$ natürlicher Größe. — Fr = Frontale, Ju = Jugale, La = Lacrymale, Mx = Supramaxillare, Na = Nasale, Pa = Palatinum, Pmx = Praemaxillare, Smx = Septomaxillare. (Nach R. Broom, 1910.)

† 1. Familie: Tritylodontidae.

† Tritylodon (= Triglyphus). — Trias von Südafrika (Karooformation) (Fig. 1) und Rhät von Württemberg.

† Tritylodon wird von manchen Paläontologen zu den Reptilien gestellt (F. v. Huene); nach R. Broom (1910) gehört die Gattung zu den Allotherien. Backenzähne quadratisch; mit zwei oder drei Höckerreihen. Gebiß hoch spezialisiert. Keinesfalls Ahnenform der höheren Säugetiere.

† 2. Familie: **Plagiaulacidae.**

Bei †**Ptilodus** (Fig. 2) aus dem Untereozän Nordamerikas (Montana) Schädel, Becken, Ober- und Unterschenkel bekannt. Gebiß hoch spezialisiert; namentlich durch die enorme Entwicklung eines unteren Backenzahns auffallend, der mit schrägstehenden Rillen besetzt ist und eine gekörnte Schneide besitzt, die beim Schließen des Kiefer zwischen den zwei parallelen Höckerreihen der oberen Backenzähne eingreift. Nach den Untersuchungen von R. Lohr (1913) ist diese für die † Allotheria und einige lebenden Diprotodontidae kennzeichnende Gebißspezialisation eine Anpassung an das Ausgraben und Ab-

Chronologische Uebersicht der

Hauptabschnitte	Unterabteilungen	Europa		Nord-	
Eozän	Basis	**fehlt**	—	**1. Puerco** (Polymastodonzone)	
		Thanétien = Cernaysien [nach Cernays bei Reims]	Altertümliche Säugetiere (Plagiaulax, Arctocyon, Mesonyx).	**2. Torrejon** (Pantolambdazone)	
	unteres	**Sparnacien** darüber **Yprésien** (= Londinien) [Sparnacum lat. = Epernay; Ypres, Ortschaft in Flandern]	Reger Formenaustausch mit Nordamerika. (Coryphodon, Hyracotherium [i. e. älteste Equiden], Lophiodon, Palaeonictis; später Dichobune, Adapisoriculus, Plesiadapis, Hyaenodictis, Propachynolophus usw.).	**3. Wasatch** (Coryphodonzone)	
	mittleres	**Lutetien** (= Parisien) [Lutetia = Paris]	In Europa fehlen die Tapire und Titanotherien gänzlich; die Miacidae sind selten. Die damals lebenden Familien haben keine oder nur wenige Nachkommen in der heutigen Fauna (Igel, Maulwürfe, (?) Chiromys). Ausnahmslos haben die Ungulaten dieser Zeit brachyodonte Molaren. Der Faunencharakter des Lutetien und Bartonien ist einheitlich, erst gegen Ende des Ludien treten neue Formen auf.	**4. Wind River** (Lambdotherium und Bathyopsiszone) **4 a. Huerfano** (Lambdotherium- und ? Uintatheriumzone) **5. Bridger** a) Unterer Teil: Orohippuszone)	
	oberes	**Bartonien** [nach den Barton Clays von Hampshire in England]	Lophiodon stirbt aus; mehrere große Lophiodonten leben noch. Chasmotherium tritt auf. In dieser Zeit sind Säugetierreste in Spalten und Klüften der Jurakalke in Bayern und bei Mormont abgelagert worden (Bohnerze).	b) (oberer Teil: Uintatheriumzone) **6. Washakie** a) Uintatheriumzone	**7. Uinta** a) Uintatheriumzone
		Ludien [nach den Mergel von Ludes im Pariser Becken]	In diese Zeit fällt die Ablagerung der Gipse des Montmartre, deren Fauna zuerst C. G. Cuvier beschrieb. Die Säugetiere liegen in den obersten Schichten der Gipse; Lophiodon ist bereits zu dieser Zeit erloschen. Erstes Auftreten von Anoplotherium, Caenotherium, Cynodictis usw.)	b) Eobasileuszone	b) Eobasileuszone
				—	c) Diplacodonzone

schneiden von Wurzeln. Das Gebiß umfaßt $\frac{1}{1}$ Schneidezähne, $\frac{1}{0}$ Eckzahn, $\frac{6}{4}$ Backenzähne.

Die ersten Plagiaulaciden erscheinen in der Trias von Württemberg und Somerset († Microlestes), doch sind nur einzelne Backenzähne bekannt. † Plagiaulax (Oberer Jura (Purbeck) und Unterkreide (Wealden) von England). † Neoplagiaulax (Basaleozän von Frankreich [Cernays bei Reims] und Neumexiko).

(Anmerkung. Obwohl keinerlei Anzeichen eines Zahnwechsels bei den Plagiaulacidea bekannt sind, so pflegen doch Prämolaren und Molaren unterschieden zu werden. Dies ist un-

tertiären Säugetierfaunen.

amerika	Asien	Afrika	Südamerika
1. **Faunenphase.** Altertümliche Säugetiere mit verwandtschaftlichen Beziehungen zu südamerikanischen und europäischen Formen.	unbekannt unbekannt	unbekannt unbekannt	**Notostylops-schichten** altertümliche Formen, die aus Nordamerika stammen. Protungulaten (z. B. Bunolitopternidae) sowie die Vorläufer der Typotheria (Notopithecidae, ferner die Notostylopidae (Ahnen der Entelonychia), ferner sehr tiefstehende Ungulaten wie Trigonostylopidae, Albertogaudryidae, Didolodus, Carolozittelia usw. beweisen ein höheres Alter. Die Notostylopsschichten entsprechen wahrscheinlich dem Basaleozän und Untereozän. Südamerika ist seit dem „Notostylopense" von Nordamerika wie von Afrika und Europa gänzlich isoliert.
2. **Faunenphase.** Erste Modernisierung. Invasion moderner Typen in die altertümliche Fauna. Landverbindung mit Südamerika unterbrochen, Faunenaustausch mit Westeuropa. Beginn des Aussterbens der altertümlichen Typen.	unbekannt	unbekannt	
3. **Faunenphase.** Aufhören der Einwanderung aus Eurasien. Ruhige Entwickelung der altertümlichen und modernen Elemente, die im Unter- und Mitteleozän um die Vorherrschaft ringen. Später Erlöschen der alten Typen. Divergente Entwickelung der nordamerikanischen und europäischen Faunen. Aufblühen der Ungulaten, besonders der Perissodaktylen.	unbekannt	In Aegypten enthält die untere Mokattamstufe neben den ältesten Walen (Archaeoceten) die ältesten Sirenen (Eotherium, Protosiren), aber keine Landsäugetiere. Die weißen Mokattamkalke sind marin.	
Ebenso wie in Europa das Säugetierleben von Lutetien bis zum Ende des Ludien ein einheitliches Ganzes darstellt, ist dies auch in Nordamerika in der Zeit vom Wind River bis Ober-Uinta der Fall gewesen. Gewaltige vulkanische Katastrophen haben in dieser Zeit, namentlich im Bridger und Uinta, ganze Herden verschüttet, so daß tausende von Resten in diesen Schichten begraben liegen.	unbekannt	In der oberen Mokattamstufe treten die ältesten afrikanischen Landsäugetiere auf: Moeritherium, Barytherium; weiter finden sich in diesen marinen Schichten Archaeoceten (Zeuglodon) und Sirenen (Eosiren).	Lücke

Haupt-abschnitte	Unter-abteilungen	Europa		Nord-
Oligozän	unteres	**Sannoisien** (= Unter-Tongrien) [nach den Mergeln von Sannois, Frankr., Tongres in Belgien]	In Europa stellt die Säugetierfauna dieser Zeit im wesentlichen die Fortsetzung der Fauna der Ludienfauna dar (Palaeotherium, Plagiolophus, Anoplotherium, Xiphodon). Daneben treten neue Formen auf, die nicht aus Nordamerika, aber vielleicht aus Asien stammen; endlich finden sich Einwanderer aus Nordamerika, ein Beweis für einen neuerlichen Faunenaustausch. Mit Ausnahme des riesigen Hyaenodon sind die Carnivoren klein.	8. **Chadron** (Titanotheriumzone)
	mittleres	**Stampien** (= Ober-Tongrien)	Einwanderung neuer Perissodaktylen aus Nordamerika; erstes Erscheinen der Tapire, zweihörniger Nashörner (Diceratherium). Amynodonten (Cadurcotherium); Anwachsen der Artiodaktylen; echte Katzen.	9. **Unterer Brule Clay** (Oreodonzone) (= White River-Group)
	oberes	**Aquitanien**	In dieser Zeit überwiegen in Europa Ablagerungen aus Süßwassersümpfen, Braunkohlen und Süßwasserbildungen i. A. (z. Ulm). Zahlreiche Stämme scheinen erloschen zu sein; unsere Kenntnis der europäischen Fauna aus dieser Zeit beschränkt sich nur auf die Sumpf- und Tieflandfauna (Anthracotherien, Tapire, Sumpfnashörner, Schweine, Biber), in der auch Raubtiere erscheinen (Amphicynodon, Cephalogale sowie der große Amphicyon).	10. **Oberer Brule Clay** (= unterer John Day) (Leptaucheniazone) 11. **Mittlerer John Day** (Diceratheriumzone) 12. **Oberer John Day** (Promerycochoerus-zone)
Miozän	unteres	**Burdigalien**	Die charakteristischen Oligozäntypen verschwinden. Die Gegensätze zur gleichalten Fauna Nordamerika hauptsächlich darin begründet, daß aus Europa vorwiegend Sumpfland- und Waldlandtypen bekannt sind, aus Nordamerika vorwiegend Savannentypen.	13. **Arikaree** (Promerycochoerus zone)
	oberes und mittleres	**Vindobonien**	Einwanderung neuer Stämme aus Asien und zum geringen Teil aus Afrika: Ursidae, Affen, u. zw. Menschenaffen (Dryopithecus, Pliopithecus), Stachelschweine; Tetrabelodon, Dinotherium, Aceratherium unter den größeren Säugetieren dominierend, Macrotherium selten. Neue Einwanderung der Equiden (Anchitherium) auf dem Wege über Asien. Zone des Tetrabelodon angustidens.	14. **Deep River** (Ticholeptuszone)

amerika	Asien	Afrika	Südamerika
4. Faunenphase. Zweite Modernisierung. Erstes Auftreten der „Great Plainsfauna" in den weiten Steppen- und Grasebenen. Fehlen aller altertümlichen Typen mit Ausnahme der Hyaenodontiden. Wiederherstellung des Faunenaustausches mit Europa, gefolgt von einer langen Periode ruhiger und unabhängiger Entwickelung und teilweisem Aussterben der Fauna am Ende des unteren Miozäns.		In den fluviomarinen Schichten Aegyptens Palaeomastodon, Arsinoitherium, Saghatherium, Hyracoidea, Ancodon, großeCreodontier (Pterodon, Apterodon, Sinopa). Die ersten Menschenaffen (Propliopithecus).	Lücke
Aus dem Big-Bad-Lands (S. Dakota) allein 150 verschiedene Säugetierarten bekannt (= Stampien). In der Oreodonzone eine Steppenfauna und eine Tiefland-Sumpffauna zu unterscheiden. Vorherrschend Amynodonten (Metamynodon) und große Anthracotherien.	unbekannt		**Astraponotusschichten** Fortsetzung der Notostylopsfauna, aber verarmt. Die ersten Glyptodontia treten auf, neben ihnen die Notohippidae, Archaeohyracidae und Astrapotheriidae.
Im oberen Brule Clay Protoceras, Tapire, Pferde, (Mesohippus); Machairodontinen (Eusmilus).		Lücke	
Im John Day von Oregon hauptsächlich Savannentiere. 100 Säugetierarten bekannt. Die Hyaenodontiden sind gänzlich erloschen. Aufblühen der Perissodaktylen: Equiden, Tapiriden, Rhinocerotiden und der Ancylopoda (Chalicotheriiden).	**Obere Narischichten** (Ostindien) Große Anthracotherien (Anthracotherium, Brachyodus, Ancodus, Merycops, Hyoboops, Proboscidier (Tetrabelodon, Dinotherium), Gelocus, Progiraffa, Aceratherium Blanfordi, Diceratherium, Amphicyon, Cephalogale, Pterodon.		Lücke
In der Arikaree Fortsetzung der John-Day-Fauna mit neuen Formen (z. B. Miohippus (Equide), Blastomeryx (Cervide), Oreodontiden (Merycochoerus, Merychyus), Procyoniden (Phlaocyon) usw.).		Aus Aegypten nur wenige Formen bekannt (Brachyodus, Mastodon, Rhinocerotidae). Von Karungu am Victoria-Nyanza ein primitives Dinotherium bekannt.	**Pyrotheriumschichten** Die ersten Nager, die wahrscheinlich aus Nordamerika stammen. **Colpodonschichten** Vermehrung der Nager. Colpodon sehr häufig. Aequivalent des marinen „Patagonien".
5. Faunenphase. Neue Einwanderungen aus Eurasien. Erstes Auftreten der Proboscidier (afrikanischen Ursprungs), sowie der asiatischen kurzfüßigen Nashörner. Keine Verbindung mit Südamerika. Anzeichen von häufigeren sommerlichen Trockenperioden. Diese Faunenphase dauert	**Untere Siwalikschichten** (Ostindien) Tetrabelodon angustidens; Dinotherium, Amphicyon, Hyotherium, Progiraffa, Giraffokeryx, Microselenodon usw.	Lücke	**Santa Cruzschichten** außerordentlich artenreich; wichtigste Tertiärfaunen Südamerikas, Nager überaus zahlreich. Beuteltiere auf dem Höhepunkt ihrer Entwickelung in S. Am. Ein Cebide (Homunculus) vertritt die Primaten.

Hauptabschnitte	Unterabteilungen	Europa		Nord-
Pliozän	unteres	**Pontien**	Neue, große Einwanderung einer Steppenfauna aus Eurasien (Pikermifauna), gekennzeichnet durch die außerordentliche Häufigkeit der Hipparionen (Hipparionfauna). Einzelne Stämme neben den Einwanderern bleibend und sich weiterentwickelnd (Tetrabelodon longirostre; Dinotherium giganteum; Aceratherium incisivum). Unter den eingewanderten Steppentieren die Antilopen, Gazellen, Hyänen überwiegend, neben ihnen Giraffen. Die ältesten Flußpferde (Oberitalien). Chalicotherium erlischt in Europa.	15. **Unterer Olagalla** (Protohippus- und Procameluszone) 16. **Oberer Olagalla** (Peraceraszone) 16 a. **Rattlesnake**
	mittleres	**Plaisancien**	Die Fauna stellt die weiter entwickelte Unterpliozänfauna dar, in welcher verschiedene Elemente langsam erlöschen. Aus Tetrabelodon longirostre ist T. arvernense (mit rudimentärem unteren I) hervorgegangen; ein kräftiges Hipparion (H. crassum) erscheint im Astien und lebt bis zum Ende der Pliozänzeit; im Oberpliozän (Sizilien) erscheint zum erstenmal der große Elephas meridionalis, ein Einwanderer aus Asien; zur selben Zeit tritt ein echtes Pferd (Equus Stenonis) auf; ein großes Nashorn (Coelodonta etruscus) ersetzt den älteren Diceros leptorhinus; langsam bereitet sich in der präglazialen Fauna die Fauna der Eiszeit vor.	17. **Blanco** (Glyptotherium-zone,
		Astien		
	oberes	**Sizilien**		

amerika	Asien	Afrika	Südamerika
bis zum oberen Ende des Olagalla und Rattlesnake. Gegen Ende der fünften nordamerikanischen Faunenphase reiche Entfaltung der Rhinocerotidae (Teleoceras, Peraceras, Aphelops) und Spezialisation der Tetrabelodon- und Mastodon-Arten.	**Mittlere Siwalikschichten.** Erstes Auftreten von Stegodon, daneben Tetrabelodon punjabiense. Hipparion und große Antilopen häufig; unter den Giraffen Helladotherium und Hydaspitherium an Stelle der älteren Formen (Giraffokeryx u. Bramatherium). Große Übereinstimmung mit Pikermi und Samos. Aus Persien, Kleinasien und China gleichalterige Faunen bekannt.	Lücke	Lücke
6. Faunenphase. Im Gegensatz zu Europa und Asien aus dieser Zeit wenige Formen bekannt. Die Verbindung mit Südamerika wiederhergestellt. Einwanderung der südamerikanischen Glyptodonten und Gravigraden; ein breiter Auswandererstrom flutet von Nordamerika nach Südamerika, die endemischen Formen langsam verdrängend. Die Landverbindung scheint zuerst nur von kurzer Dauer gewesen zu sein und ist erst später definitiv geworden.	**Obere Siwalikschichten.** Erstes Auftreten von Equus, Bos, Elephas, Camelus. Unter den Giraffen das große Sivatherium auf diese Stufe beschränkt. Aus Nordamerika wandern fortgesetzt neue Typen ein (Nashörner, Caniden, Wölfe, Füchse, Tapire) und es findet ein reger Faunenaustausch mit Afrika und Europa statt. Die Fauna des indomalaiischen Archipels beginnt sich vom Festlande zu emanzipieren.	In Algier und Nordägypten vereinzelte Reste, die einer jüngeren Fauna als der Pikermifauna angehören. Eine große Giraffe (Libytherium), Machairodus, Hipparion, Tetrabelodon, Hippopotamus.	Wiederherstellung der Landbrücke mit Nordamerika. Eine große Schar Carnivoren (Katzen, Machairodus, Bären, Hunde, Stinktiere), ferner Cameliden (Lama), Equiden (Parahipparion), Hirsche (Cariacus) und Pekaris (Dicotyles) wandern ein. Die endemische Fauna verarmt, die gegen die Angriffe der Carnivoren ungeschützt ist; vom Notostylopense an gab es in Südamerika außer kleinen Raubbeutlern *keine großen Raubtiere*. Langsam stirbt die neogäische Tertiärfauna bis auf wenige Reste aus. Aber noch im Plistozän (*Pampasformation, ältester Teil = Monte Hermoso-Schichten*) sind noch viele neogäische Tiere, darunter die riesenhaften Gravigraden, Glyptodonten usw. am Leben.

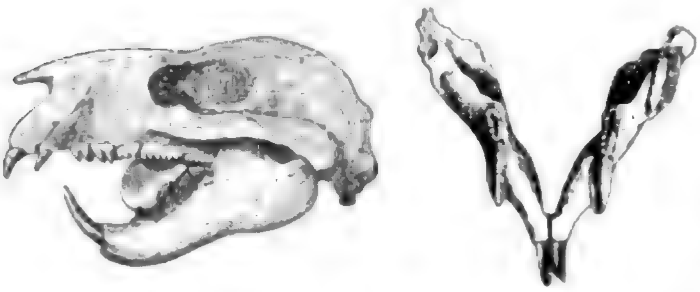


Fig. 2. Schädel und Unterkiefer von †Ptilodus gracilis aus dem Basaleozän (Fort-Unionformation) von Montana. Natürliche Größe. Rekonstruktion auf Grundlage der Abbildungen von J. W. Gidley.

richtig; alle hinter den Eckzähnen stehenden Zähne können nur als „Backenzähne" bezeichnet werden).

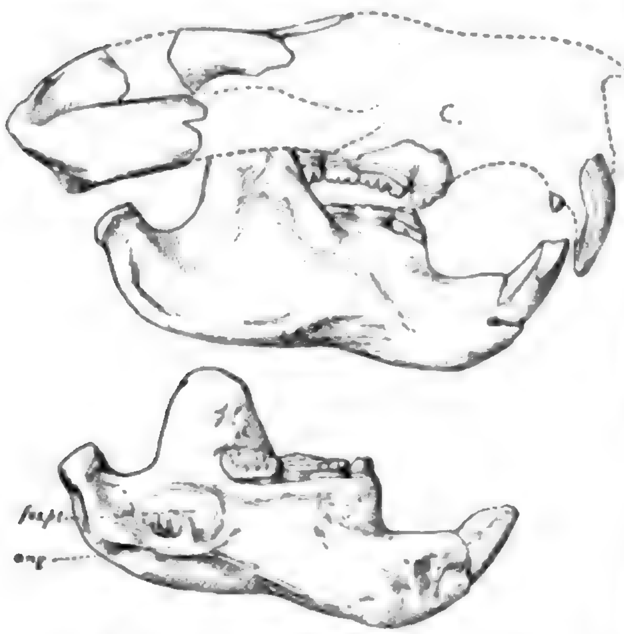


Fig. 3. Schädel und Unterkiefer von †Polymastodon taoense, in ca. $^2/_3$ natürlicher Größe. Nach W.D.Matthew. Aus W. K. Gregory, 1910.

† 3. Familie: Polymastodontidae.

Nur eine Gattung († Polymastodon) aus dem Puerco von Neumexiko bekannt (Fig. 3). Das Gebiß umfaßt einen sehr kräftigen, wahrscheinlich als Nagezahn funktionierenden Inzisiven, dann folgt nach einer großen Lücke ein kleiner, hierauf ein sehr großer und dann wieder ein kürzerer Backenzahn. Die Kronen der unteren Backenzähne sind aus zwei, die der oberen aus drei parallelen Längsreihen von Höckern aufgebaut. Das Tier erreichte die Größe eines Bibers.

4. Familie: Polydolopidae.

Nur aus dem Untereozän Patagoniens bekannt (Notostylopsschichten). Wahrscheinlich die Nachkommen der Plagiaulacidae. Zahlreiche kleine Arten, die sich auf verschiedene Gattungen verteilen († Polydolops, † Propolymastodon usw.).

2. Unterordnung: Diprotodontia (Pflanzenfressende Marsupialier).

Heute mit Ausnahme von Caenolestes (lebend in Südamerika, Ecuador) auf Australien be-

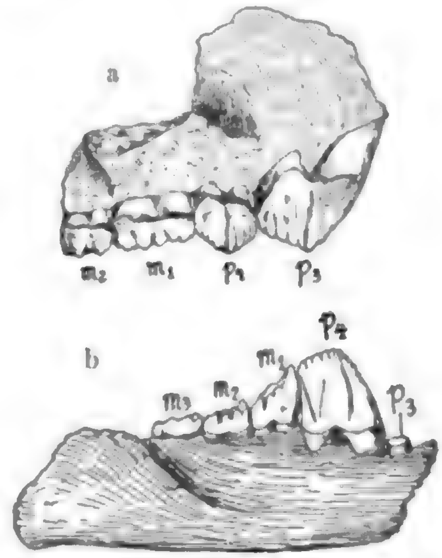


Fig. 4. a) Oberkiefer, b) Unterkiefer von †Polydolops Thomasi aus dem Untereozän Patagoniens. $^3/_2$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.



Fig. 5. Unterkiefer von †Propolymastodon Carolo-Ameghinoi. Untereozän Patagoniens. Natürliche Größe. Nach F. Ameghino.



Fig. 6. Unterkiefer von †Abderites crassiramis aus dem Miozän Patagoniens (Santa-Cruz-Schichten.) $^3/_2$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

schränkt; fossil im Miozän Patagoniens und Plistozän Australiens.

1. Familie: Caenolestidae.

† Garzonia (Miozän von Santa Cruz) besitzt trituberkuläre obere Backenzähne, die unteren sind tuberkulärsektorial. In der Zahnreihe des Unterkiefers von †Abderites (Miozän von Santa Cruz) ragt ein seitlich geriefter Zahn mit gekörnter Schneide hoch über die anderen empor, die vor ihm stehenden 4 Zähne sind rudimentär. (Fig. 6).

2. Familie: Phalangeridae (Beutelfüchse).

Fossil im Plistozän Australiens.

† Thylacoleo von der Größe eines Panthers

besaß weit ausladende Jochbögen und eine stark verkürzte Schnauze. Der Gesamteindruck des Schädels ist katzenartig. Das Tier muß eine räuberische Lebensweise geführt haben; da die Eckzähne bei den Vorfahren verloren gegangen waren, haben die I die Aufgabe der C übernommen. Die Endphalangen der Gliedmaßen besaßen große, gekrümmte Krallen. In Knochenhöhlen Australiens (Plistozän). (Fig. 7.)

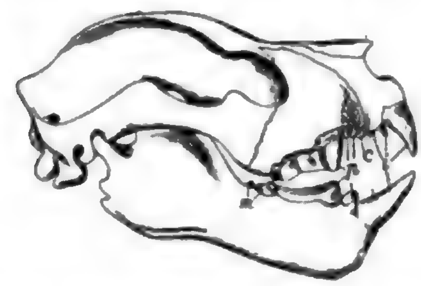


Fig. 7. Schädel von †Thylacoleo carnifex aus dem Plistozän von Queensland. i = Inzisiven, c = Eckzahn, p und m = Backenzähne. $^1/_4$ natürlicher Größe. Nach A. Smith-Woodward.

† Wynyardia wurde ein Marsupialierrest genannt, der nur aus einem Kieferfragment ohne Zähne besteht. Es ist dies der einzige Rest eines Beutlers aus dem Tertiär Australiens. Vielleicht gehört † W. in die Verwandschaft der Känguruhratten. Die echten Känguruhs treten erst im Plistozän Australiens auf; einige erreichten beträchtliche Körpergröße. Von plistozänen Phalangeriden sind aus Australien dürftige Reste bekannt.

3. Familie: Phascolomyidae (Wombate).

Die Gattung †Diprotodon (Fig. 8) ist die größte unter allen lebenden und fossilen Marsupialiergattungen und erreichte die Größe eines Nashorns. Häufig im Plistozän der Salzsümpfe

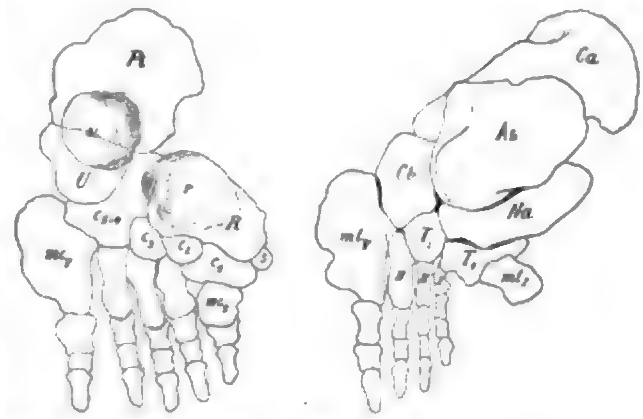


Fig. 8. Links: Hand, rechts: Fuß von †Diprotodon australe aus dem Plistozän Südaustraliens. Pi = Pisiforme, U = Ulnare, R = Radiale, u = Gelenkfläche gegen die Ulna, r = Gelenkfläche gegen den Radius, s = Sesambein, c 1—5 distale Carpalia, mc = Metacarpalia, Ca = Calcaneus, As = Astragalus, Cb = Cubo d, Na = Naviculare, T_1, T_2 = Cuneiformia, mt = Metatarsalia, II, III, IV = Metatarsalia der 2.—4. Zehe. $^1/_8$ natürlicher Größe. Nach E. C. Stirling.

am Callabonnasee (SO-Australien). Fuß und Hand sind hoch spezialisiert; namentlich im Fuß sind die drei mittleren Zehen verkümmert, die Großzehe sowie das fünfte Metatarsale sehr verstärkt, unförmig. Die Tarsalia sind zu enormen Knochenklumpen entwickelt, ebenso die Carpalia. Das Tier kann sich nur sehr schwerfällig, wie mit Klumpfüßen bewegt haben. In der Magengegend einiger Skelette fand man Reste von Halophyten (Salzpflanzen).

3. Unterordnung: Polyprotodontia (Fleischfressende Marsupialier).

Die ältesten Gattungen in der Obertrias von Nordkarolina († Dromatherium und † Micro-

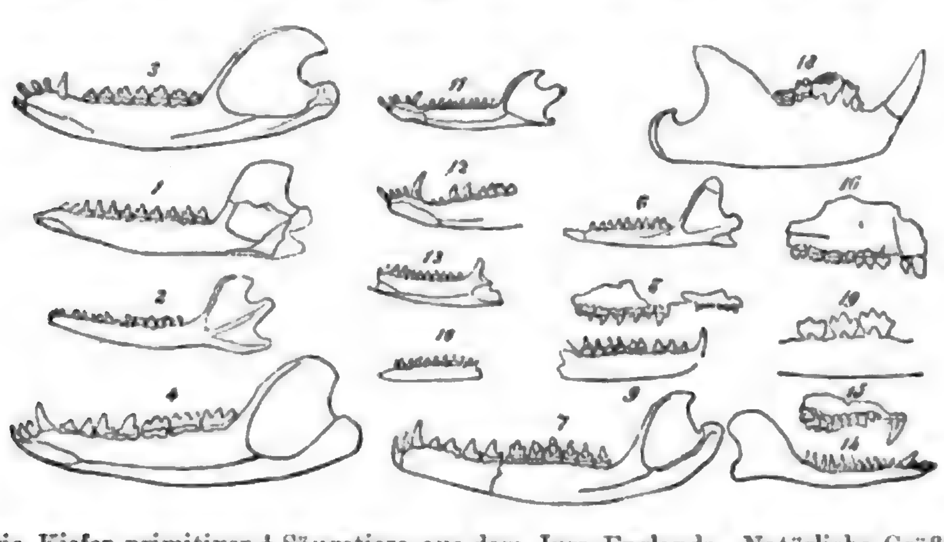


Fig. 9. Die Kiefer primitiver † Säugetiere aus dem Jura Englands. Natürliche Größe. I. Marsupialia, Allotheria, Plagiaulacidae: Plagiaulax (18), Bolodon (16). II. Marsupialia, Polyprotodontia, Triconodontidae: Amphilestes (1), Triconodon (4), Phascolotherium (3), Spalacotherium (7), Peralestes (8). III. Placentalia, Pantotheria: Amphitherium (2), Peramus (6), Leptocladus (10), Amblotherium (11), Achyrodon (13), Peraspalax (9), Phascolestes (12), Stylodon (14), Kurtodon (= Athrodon) (15). IV. Incertae sedis: Stereognathus (19). Nach H. F. Osborn, 1888.

conodon), sowie in der Trias von Südafrika († Tribolodon und † Karoomys). Diese kleinen Formen sind möglicherweise Uebergangsformen zwischen den Reptilien und Säugetieren, aber die Reste sind bisher zu dürftig, um weitergehende Schlüsse auf ihnen aufzubauen.

Im oberen Jura von England (Purbeckschichten) und Nordamerika (Atlantosaurus Beds) sind mehrere Gattungen entdeckt worden, die Osborn als Triconodonta zusammenfaßt. Diese durchwegs kleinen Tiere waren insectivor (vielleicht carnivor). Die wichtigsten Gattungen sind: † Amphilestes, † Triconodon, † Triacanthodon, † Phascolotherium (England); † Priacodon, † Tinodon (Wyoming). Diese Gattungen, meist nur aus Unterkiefern bekannt, besaßen Backenzähne mit drei hintereinander stehenden Spitzen und starkem inneren Basalband; der Winkel des Unterkiefers war nach innen eingebogen (wie bei Polyprotodontiern).

Die Dasyuridae (Raubbeutler) erscheinen zuerst im Eozän Patagoniens († Procladosictis); im Miozän werden sie häufiger. Ameghino hat alle tertiären Dasyuriden Südamerikas als Sparassodonta zusammengefaßt. Im Miozän von Santa Cruz † Amphiproviverra (mit großer, opponierbarer Großzehe). † Cladosictis (Hallux bereits rudimentär), † Prothylacinus (Hallux bis auf ein winziges Rudiment verkümmert). Von den zahlreichen neogäischen Gattungen sei noch † Borhyaena genannt.



Fig. 10. Unterkiefer von † Prothylacinus patagonicus aus dem Miozän Patagoniens. In 1/2 natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

Die Beutelratten oder Didelphyidae sind aus dem Obereozän bis Untermiozän Europas und aus Nordamerika vom Eozän an bekannt.

Den polyprotodonten Beutlern ist vielleicht noch † Caroloameghinia (von unsicherer systematischer Stellung) anzureihen.

II. Unterklasse: **Placentalia.**

† I. Ordnung: Pantotheria (= Trituberculata).

Die Pantotheria bilden den Uebergang von den mesozoischen Beuteltieren zu den Placentaliern. Sie erscheinen zuerst in der Juraformation; somit muß die Spaltung zwischen Marsupialiern und Placentaliern weiter zurückliegen und in die Trias fallen. Von den Polyprotodontiern unterscheiden sie sich durch das Fehlen der Einziehung des Unterkieferwinkels. Die oberen Backenzähne sind trituberkulär und besitzen dreieckigen Kronenumriß (z. B. † Kurtodon); die unteren Backenzähne gleichfalls dreieckig, aber gegen die oberen verkehrt gestellt; hinter dem zweiwurzeligen Eckzahn stehen in der Regel 11 Backenzähne, unter denen P und M nicht unterscheidbar sind (auch die Zahnform gibt keinen Anhaltspunkt). (Vgl. Fig. 9.)

† 1. Familie: Amphitheriidae. — Unterer und oberer Jura Englands. († Amphitherium [Unterjura] usw.).

† 2. Familie: Amblotheriidae. — Oberer Jura Englands und Nordamerikas. († Amblotherium [Oberjura] England). † Peraspalax (ebenda), † Kurtodon (ebenda), † Stylacodon (Oberjura, Wyoming).

† 3. Familie: Paurodontidae. — Oberer Jura, Wyoming. † Paurodon.

† 4. Familie: Diplocynodontidae. — Oberer Jura, Wyoming. † Diplocynodon usw.

II. Ordnung: Insectivora (Insektenfresser).

Die Insectivoren sind als der eigentliche Wurzelstamm der höheren Placentalierstämme zu betrachten; sie stehen nach den Pantotherien auf der tiefsten Stufe unter allen Placentalierordnungen. In Australien fehlen sie und sind auch fossil nicht von dort bekannt; seit dem Eozän leben sie in Europa, Nordamerika, Asien und Afrika. Aus Südamerika ist nur ein einziger fossiler Insectivore aus dem Miozän von Santa Cruz bekannt, der den Chrysochloriden (Goldmullen) angehört († Necrolestes).

1. Unterordnung: Dilambdodonta.

Obere M. echt trituberkulär, oft mit Hypocon, untere M. tuberkulosektorial, Talonid kräftig.

† 1. Familie: Leptictidae. — Untereozän bis Oligozän Nordamerikas. Oben und unten nur 2 Schneidezähne (unten manchmal ein dritter). † Palaeictops (Wasatch), † Leptictis (White River).

2. Familie: Talpidae (Maulwürfe). Zuerst († Nyctitherium) im Mitteleozän (Bridger) Nordamerikas. Von da ab im Tertiär Nordamerikas und Europas. Talpa zuerst im Miozän Europas. Myogale zuerst im europäischen Plistozän.

3. Familie: Soricidae (Spitzmäuse). Zuerst im Oligozän Nordamerikas († Protosorex im White River).

† 4. Familie: Dimylidae. — Im Miozän Europas. Grabende Tiere, aber nicht mit Talpiden verwandt. († Dimylus, † Cordylodon usw.).

5. Familie: Erinaceidae (Igel). — Zuerst im Obereozän Frankreichs († Necrogymnurus, Phosphorite des Quercy). Erinaceus zuerst im Obermiozän Europas. In Nordamerika seit dem White River.

† 6. Familie: Adapisoricidae. Nur aus dürftigen Resten bekannt. (Untereozän von Reims: † Adapisorex, † Adapisoriculus.)

† 7. Familie: Hyopsodontidae. Schädel igelähnlich, Gebiß vollständig. Nur in Nordamerika: † Hyopsodus vom Wasatch bis Uinta (Fig. 11).

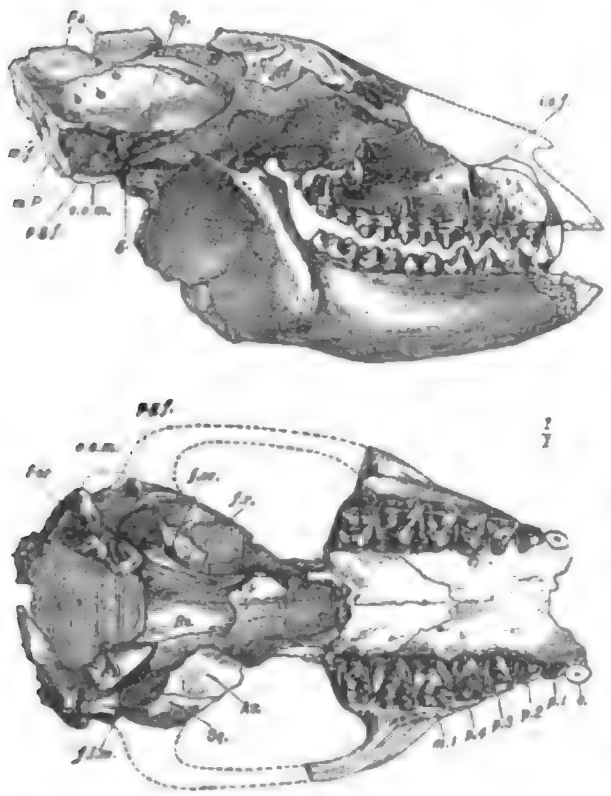


Fig. 11. Schädel von †Hyopsodus paulus aus dem Mitteleozän (Bridger) Nordamerikas. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn.

†8. Familie: Mixodectidae. Erinnern an †Anaptomorphidae (Primaten); von Schlosser (1911) den Insectivoren angereiht. In Nordamerika vom Torrejon (†Mixodectes, †Oldobotes) bis zum Bridger (†Microsyops usw.). Aus Afrika †Metoldobotes bekannt (Unteroligozän des Fayum).

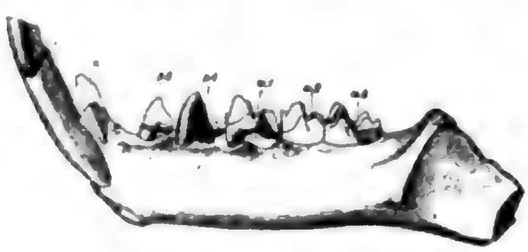


Fig. 12. †Mixodectes pungens. — Torrejon. $^2/_1$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn, 1912.

†9. Familie: Plesiadapidae. †Plesiadapis und †Protoadapis im Untereozän Mitteleuropas. Vielleicht Vorläufer der Nager. Mit Primaten nicht verwandt.

†10. Familie: Pantolestidae. Nur in Nordamerika; ob die unteroligozäne †Ptolemaia (Aegypten) hierher zu stellen ist, ist sehr fraglich. †Pantolestes (Bridger) zeigt unverkennbare Anpassungserscheinungen an aquatiles Leben in der Gestalt der Gliedmaßen und der beträchtlichen Schwanzlänge.

†11. Familie: Tillodontidae. Trotz einseitiger Spezialisation der Schneidezähne, deren Form an Nager erinnert, ist diese Gruppe, die durch untereozäne bis mitteleozäne Gattungen aus Europa und Nordamerika bekannt ist, den Insectivoren anzureihen. Von †Esthonyx (Wasatch) ist das Gebiß und mehrere Skeletteile bekannt, von †Tillotherium, das die Größe eines Bären erreichte, kennt man fast das ganze Skelett. Tillotherium ist auf das Mitteleozän (Bridger) Nordamerikas beschränkt.

II. Unterordnung: Zalambdodonta.

Von Centetiden kennt man fossile Reste aus dem Alttertiär Nordamerikas, von den Chrysochloriden aus dem Mitteleozän bis Untermiozän Nordamerikas und den Santa-Cruz-Schichten Südamerikas (†Necrolestes); die sind Goldmulle heute auf Südafrika beschränkt.

III. Ordnung: Chiroptera (Fledermäuse).

Die Fledermäuse sind aus primitiven Insektenfressern in sehr früher Zeit, wahrscheinlich schon vor der Eozänzeit, entstanden. Sie werden in zwei Gruppen geteilt: 1. Microchiroptera (kleine insektenfressende Formen) und 2. Megachiroptera (große, frugivore Formen).

Microchicopteren sind im Eozän mit Ausnahme der Phosphorite des Quercy selten. Häufiger werden sie erst im Pliozän (europäische Eiszeitfauna und plistozäne Höhlenfaunen Brasiliens); ihre Seltenheit erklärt sich aus der Kleinheit und der geringen Erhaltungsmöglichkeit. Von Megachiropteren ist bisher nur eine einzige fossile Gattung, †Archaeopteropus transiens aus den oberoligozänen Ligniten von Monteviale in Oberitalien bekannt.

IV. Ordnung: Carnivora (Raubtiere).

I. Gemeinsame Merkmale der Ordnung.

Die zwei größten und mächtigsten Zweige des Säugetierstammes sind die Ungulaten und die Carnivoren. Während die ersteren eine ungeheure Formenfülle entwickelt haben, das Gebiß die mannigfaltigsten Spezialisationen erreicht hat und die Umformung der ursprünglich sehr einfach gebauten Gliedmaßen auf sehr verschiedenen Wegen erfolgt ist, stellen die Landraubtiere einen merkwürdig einheitlich gebliebenen Stamm dar, der an Formenreichtum hinter den Ungulaten weit zurücksteht, wenige extreme Spezialisationen aufweist und in der Differenzierung des Gebisses kaum mit den hochspezialisierten Gebißtypen der Ungulaten einen Vergleich aushalten kann. Abgesehen von der einseitigen Spezialisation der †Machairodonten, deren Eckzähne sich zu gewaltigen Hauern ausgebildet haben, ist das wesentliche Merkmal der phylogenetischen Entwicklung des Landraubtiergebisses in einer Reduktion und Vereinfachung des Gebisses gelegen. Die Umformung der Gliedmaßen hält ebenfalls keinen Vergleich mit jener der Ungulaten aus und ist in allen Gruppen der Landraubtiere auf relativ tiefer Stufe stehen geblieben. Dagegen haben die Landraubtiere in der Spezialisation des Gehirnes eine hohe Entwickelungsstufe erreicht, die nur mit jener der Primaten verglichen werden kann.

Ursprünglich sind die placentalen Raubtiere ausschließlich Landbewohner gewesen. Zu ver-

schiedenen Zeiten hat jedoch vom Lande aus eine Einwanderung der Raubtiere in das Süßwasser und in das Meer stattgefunden. Im frühen Eozän hat sich vom Stamm der Landraubtiere ein Zweig losgelöst, der sich rasch an das Leben im Meere anpaßte und die Wurzel des außerordentlich formenreichen, in der Gruppe der Delphinoceten noch heute in voller Blüte stehenden Stammes der Cetaceen darstellt. In späterer Zeit hat sich der Stamm der Pinnipedier vom Stamm der Landraubtiere getrennt, ist aber nach frühzeitiger Erreichung der Anpassung an das Meeresleben auf relativ tiefer Stufe stehen geblieben. In der Gegenwart sehen wir in Enhydris marina, dem Seeotter, eine Form, die einen Übergang von den Flußottern zu einem neuen Stamme mariner Raubtiere darstellt.

Während die Pinnipedier und die Ottern den Carnivoren angegliedert zu werden pflegen, wird die Gruppe der Cetaceen allgemein als eigene Ordnung von den Carnivoren abgetrennt, obwohl sie mit den Raubtieren durch die Stammgruppe der Archaeoceten oder Urwale verknüpft ist.

II. Systematik der Carnivoren.

Stammgruppe: Creodonta. Sie umfaßt sowohl die Ahnen der lebenden Raubtierfamilien als auch eine Reihe erloschener Formen. Alle Raubtiere des Eozäns werden zu den Creodonten gerechnet; ebenso stellt man die erloschenen Endglieder einzelner Reihen aus dem Oligozän noch zu den Creodonten. Die übrigen Landraubtiere vom Beginne des Oligozäns an werden dem Stamme der Fissipedier eingereiht. Aus den Creodonten gingen hervor:

I. Die Fissipedier oder die lebenden Landraubtiere (einschließlich der Ottern). Sie sind durch die Familie der Miaciden mit den Creodonten verknüpft.

II. Die Pinnipedier oder Robben, welche wahrscheinlich von Fissipediern und zwar von den Bären abstammen.

III. Die Cetaceen oder Wale, welche infolge frühzeitiger Annahme des Meereslebens einen so einseitigen Spezialisationsweg eingeschlagen haben, daß ihre Endformen in der äußeren Körpergestalt nur mehr wenige Beziehungen mit den Landraubtieren besitzen, in ihrer Organisation sich aber als unverkennbare Nachkommen derselben erweisen.

III. Das Gebiß der Landraubtiere und die verschiedenen Wege seiner Spezialisation.

Den Ausgangspunkt des Raubtiergebisses bildet, wie zuletzt W. D. Matthew in klarer Weise dargelegt hat, das Insectivorengebiß. Aus diesem Typus mit zahlreichen spitzigen Raubzähnen ist das Raubgebiß der Creodonten hervorgegangen; aus diesem sind die Raubgebisse der Fissipedier und die omnivoren Gebißtypen der Arctocyoniden (eine erloschene Creodontenfamilie) und der Bären entstanden.

In den primitiven Gebißtypen sind die oberen Molaren trituberkulär, die unteren Molaren tuberkulosektorial; die Prämoloren sind schneidend und wirken als Brech- und Scherenapparate; die Eckzähne sind kegelförmig und wirken als Reißzähne (die Bezeichnung der Brech- und Scherenapparate der Backenzähne als „Reißzähne" ist unrichtig und muß aufgegeben werden). In dem Maße, als sich aus diesem Gebißtyp ein echtes Raubgebiß entwickelt, tritt der tuberkuläre Abschnitt der Backenzähne zurück, während sich der schneidende Außenkegel verstärkt. Diese Spezialisation betrifft in der Regel nur ein oberes und ein unteres Paar von Backenzähnen. Bei den omnivoren Typen tritt die entgegengesetzte Spezialisation ein: der tuberkuläre Abschnitt der Backenzähne wird größer und der sektoriale kleiner und die Prämolaren unterliegen einer fortschreitenden Reduktion.

Bei den lebenden Landraubtieren sind mit Ausnahme der Ursiden und Procyoniden im Oberkiefer P^4, im Unterkiefer M_1 als Scherenzähne entwickelt. Bei den Creodonten fehlen entweder diese Scherenzähne gänzlich oder es sind Ansätze zu einer Verstärkung des Antagonistenpaares $\frac{P^4}{M_1}$ vorhanden, oder es sind $\frac{M^1}{M_2}$ oder $\frac{M^2}{M_3}$ als Scherenzähne ausgebildet.

Ursprünglich besaßen die Creodonten kein Scherengebiß, später differenzierten sich in verschiedenen Stämmen verschiedene Zahnpaare zu Scherenapparaten.

Vom Insectivorengebiß ausgehend, sehen wir, daß dem M^3 ein Antagonist im Unterkiefer fehlt, da M^3 dem M^2 gegenübersteht. Für eine Ausdehnung und Größenzunahme des M^3 ist im Oberkiefer kein Raum vorhanden; nach vorne kann die Vergrößerung nicht erfolgen, da dem M^3 der Wall der vor ihm durchgebrochenen Molaren als unüberwindliches Hindernis entgegensteht. In der Tat ist bei keinem Creodonten der M^3 als Scherenzahn spezialisiert worden.

Der M^2 ist der erste Zahn, der bei einem erloschenen Coeodontenstamme vergrößert wurde und der dem etwas vergrößerten M^3 gegenübersteht. Die Vergrößerung des M^2 hat bereits zur Eliminierung des M^3 geführt; der Hinterrand von M^2 ragt bis an den Gaumenrand vor. Eine weitere Vergrößerung des Antagonistenpaares $\frac{M^2}{M^3}$ war ausgeschlossen. Diesen Typus repräsentieren die †Hyaenodontiden. (Fig. 13, I).

Der zweite Weg zur Schaffung eines Scherengebisses war die Heranziehung des Antagonistenpaares $\frac{M^1}{M_2}$. (Fig. 13, II). Auch dieser Weg mußte zur Unterdrückung der hinteren Zähne führen. Die erloschene Creodontenfamilie der †Oxyaeniden zeigt, daß durch die Größenzunahme des M^1 nach hinten der M^2 nach innen aus der Zahnreihe herausgedrängt wurde und der M^3 überhaupt nicht mehr zur Entwickelung kam; im Unterkiefer wurde der M^3 unterdrückt, so daß M^2 an Raum gewann. War auch der Platz zur Entfaltung des Antagonistenpaares $\frac{M^1}{M^2}$ bei den †Oxyaeniden größer als der Platz für $\frac{M^2}{M^3}$ bei den †Hyaenodontiden, so war doch bei der Wahl des dritten Weges, der Vergrößerung des Antagonistenpaares $\frac{P^4}{M^1}$, der Platz noch geräumiger. Dieser Weg ist von der Creodontenfamilie der Miaciden eingeschlagen worden, der einzigen Familie, welche sich in ihren Nachkommen, den lebenden Fissi-

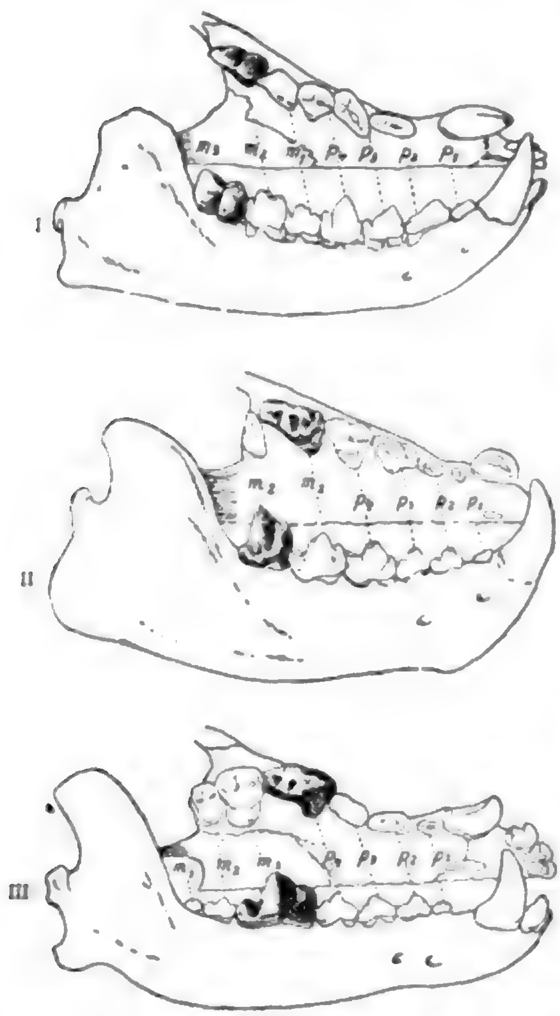


Fig. 13. Die verschiedenen Wege der Ausbildung des Brechscherenapparates im Carnivorengebiß. I. † Hyaenodon, II. † Oxyaena. III. Wolf. Nach W. D. Matthew.

pediern, bis heute erhalten hat. Alle anderen Creodontenstämme mit den Scherenapparaten $\frac{M^2}{M_3}$ und $\frac{M^1}{M_2}$ sind schon frühzeitig erloschen.

IV. Die Spezialisation des Gehirns der Carnivoren.

Die ältesten Carnivoren (z. B. †Arctocyon und †Triisodon des Basaleozäns, †Didymictis und †Sinopa des Untereozäns) besaßen ein kleines, wenig spezialisiertes Gehirn, dessen Entwickelungsstufe mit jener der Beutler zu vergleichen ist. Im Laufe der Tertiärzeit tritt in den verschiedenen Stämmen unabhängig voneinander eine auffallende Spezialisierung und Größenzunahme des Gehirns ein.

V. Die Entwicklung von Hand und Fuß bei den Landraubtieren.

Die ältesten Carnivoren besaßen fünfzehige Gliedmaßen; Hand und Fuß waren plantigrad, alle Krallen scharf, Hallux und Pollex abstehend und bis zu einem gewissen Grade opponierbar, wenn auch nicht so stark wie bei den Primaten. Diese Merkmale beweisen, daß die Ahnen der Carnivoren eine arboricole, kletternde Lebensweise führten. Bei fortschreitender Anpassung an das Schreiten und Laufen traten Veränderungen im Gliedmaßenbau ein, die vor allem in einer Vertiefung der Astragalusrolle, einer Verfestigung der Knöchelgelenke, Verlängerung der Metapodien, Verbreiterung der Krallen und einer Reduktion der Finger und Zehen bestehen. Diese Reduktion betrifft entweder den Daumen allein, so daß der Fuß tetradaktyl wird, oder es entsteht durch Reduktion der ersten und fünften Zehe ein tridaktyler Fuß. Obwohl also die Anfänge einer Artiodaktylie und Perissodactylie bei den Carnivoren vorhanden sind, so hat doch kein einziges Raubtier eine gleich hohe Spezialisationsstufe der Gliedmaßen erreicht, wie sie für die Mehrzahl der Huftiere bezeichnend ist.

Bei den Fissipediern und ihren Ahnen unter den Creodonten ist der Fußbau artiodactyl (paraxonisch), bei den † Hyaenodontiden und † Oxyaeniden perissodaktyl (mesaxonisch). Die Mesonychiden waren artiodaktyl und ihre Krallen waren hufartig.

Bei den Fissipediern sind die Krallen mitunter verbreitert und nie gespalten; bei ihren Ahnen (den Miaciden) komprimiert, spitz und nie gespalten; bei den †Hyaenodontiden, †Oxyaeniden und † Mesonychiden spitz oder verbreitert und immer gespalten.

Im Carpus sind im Laufe der phylogenetischen Entwickelung Verwachsungen eingetreten; ursprünglich getrennt, verschmelzen bei den jüngeren Formen Centrale, Intermedium und Radiale, doch begegnen wir Verwachsungen von Centrale und Radiale schon bei den untereozänen †Arctocyoniden.

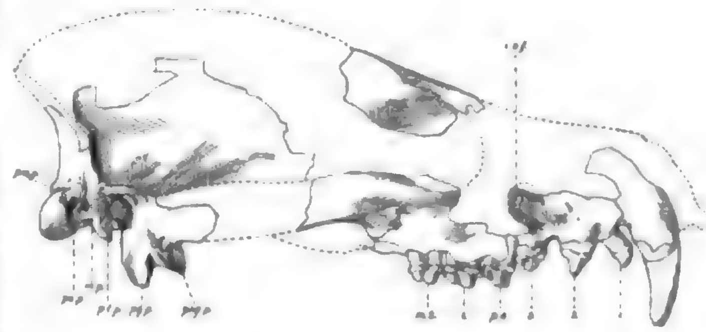


Fig. 14. †Mesonyx obtusidens, Unterer Bridger, Wyoming. $^1/_4$ natürlicher Größe. Nach W. D. Matthew.

VI. Creodonta. Systematik.

† 1. Tribus: Acreodi.

Keine Brechscherenzähne; Backenzähne primitiv. Die † Oxyclaeniden sind in dürftigen Resten (meist nur Backenzähne) aus dem Puerco und Torrejon bekannt; die † Mesonychiden lebten vom Puerco bis Ober-Uinta in Nordamerika, vom Untereozän bis Mitteleozän in Mitteleuropa. † Hyaenodictis, † Pachyaena, † Harpagolestes, † Mesonyx (Fig. 14). Fuß und Hand der Mesonychiden war paraxonisch, Daumen und Großzehe fehlten dem hundeartig gestellten † Mesonyx, dessen Krallen breit, hufartig und gespalten waren, ebenso bei † Synoplotherium.

† 2. Tribus: Pseudocreodi.

Brechscherengebiß ausgebildet; bei den † Hyaenodontiden $\frac{M^2}{M_3}$ bei den † Oxyaeniden $\frac{M^1}{M_2}$, bei

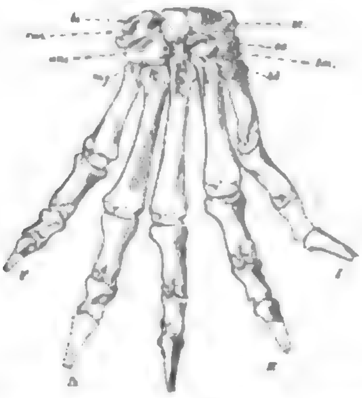


Fig. 15. Rechte Hand von † Tritemnodon agile. $^1/_2$ natürlicher Größe. Unterer Bridger, Wyoming. Nach W. D. Matthew.

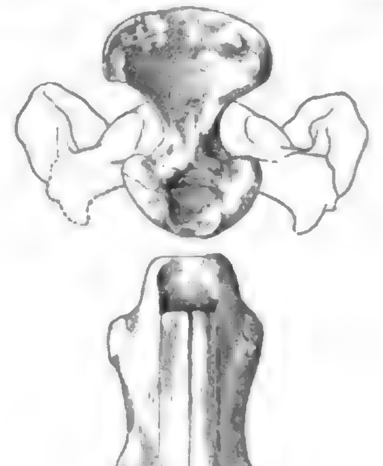


Fig. 16. † Apterodon macrognathum aus dem Unteroligozän des Fayum, Aegypten. $^1/_3$ natürlicher Größe. a Schädel von oben, b von hinten, c von rechts, d von unten. Nach H. F. Osborn, 1909.

denen der M_3 verloren ging (vgl. oben). Hand und Fuß waren fünfzehig und mesaxonisch, die Krallen gespalten (Fig. 15).

Die † Hyaenodontiden schwankten zwischen Fuchs- und Wolfsgröße, einige wenige erreichten Tigergröße. Die primitiveren Gattungen werden in der Unterfamilie † Proviverrinae zusammengefaßt (z. B. † Sinopa, † Tritemnodon, † Proviverra). Aus ihnen gingen die † Hyaenodontinen hervor: die wichtigen Gattungen sind: † Pterodon (ein tigergroßer Creodonte aus dem Eozän und Oligozän von Canada, Mitteleuropa, Aegypten), † Apterodon (Fig. 16) (eine aquatische Form mit langem Schädel und verlängerter Schnauze, sowie kurzen, gebogenen Schwimmfüßen aus dem Oligozän Mitteleuropas und Aegyptens) sowie † Hyaenodon (häufig im Alttertiär von Europa und Nordamerika). Vielleicht ist in der Gruppe der Hyaenodontiden der Anschluß an die Archaeoceten (Urwale) zu suchen; die terrestrischen Formenreihen erlöschen im Oligozän.

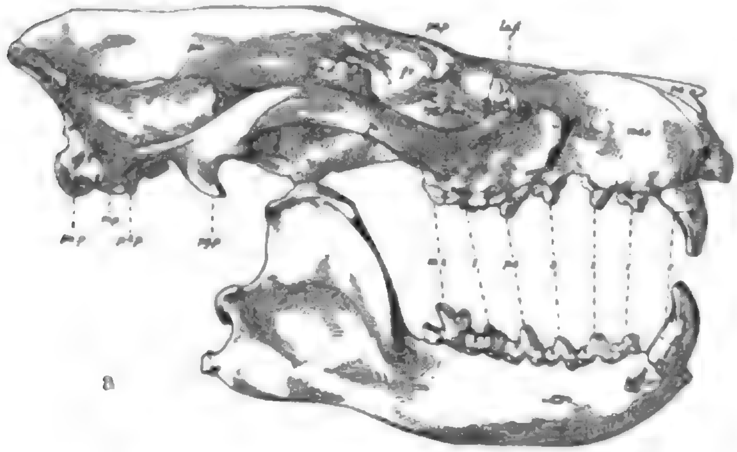
Die † Oxyaeniden mit dem Antagonistenpaar $\frac{M^1}{M_2}$ als Brechscherengebiß waren teils terrestrische, teils aquatische Raubtiere. Bei den Landbewohnern war der fünfzehige Fuß plantigrad; bei den Wasserbewohnern waren die Zehen gespreizt. † Machairoides aus dem Bridger erinnert durch die lappenartige Verlängerung der Unterkiefersymphyse an † Machairodontinen ohne mit ihnen verwandt zu sein. † Limnocyon (Bridger. Fig. 17), † Oxyaena (Wasatch. Fig. 13, II), † Patriofelis (Fig. 18. Wasatch und Bridger), † Palaeonictis (Wasatch und Eozän Frankreichs), † Thinocyon (Bridger).

3. Tribus: Eucreodi.

Kein Brechscherengebiß, oder, wenn vorhanden, das Antagonistenpaar $\frac{P^4}{M_1}$ als solches entwickelt. Ungespaltene Krallen zugespitzt, Hand und Fuß paraxonisch.

Die † Arctocyonidae besaßen vielhöckerige, bärenähnliche Backenzähne, ohne daß es bei ihnen zur Ausbildung eines Brechscherengebisses kam. Die Aehnlichkeiten mit den Ursidae sind indessen nur als Konvergenzerscheinungen infolge gleichartiger Nahrungsweise zu betrachten; die † Arctocyonidae treten im Untereozän von Frankreich (Reims), im Torrejon und Wasatch auf und sind bereits im Wind River verschwunden. Die wichtigste Gattung ist † Arctocyon (Untereozän von Reims). In der Hand von † Claenodon aus dem Torrejon von Neu-Mexiko ist das Centrale mit dem Radiale verwachsen.

Die wichtigste Gruppe der Eucreodi sind die Miacidae, welche die Stammgruppe der modernen Raubtiere darstellen. Bei ihnen erscheint das aus $\frac{P^4}{M_1}$ bestehende Brechscherengebiß zum ersten Male; in der Hand sind sie primitiver als die Fissipedier gebaut, da Centrale, Intermedium und Radiale getrennt sind. Einzelne Miaciden stehen den Hunden und Bären nahe und bilden als Miacinae eine Unterfamilie der Miaciden; die wichtigsten Gattungen sind † Miacis (Wasatch, Bridger, Uinta), † Uintacyon (Wasatch, Bridger), † Oodectes (Bridger), † Vulpavus (Wind River,



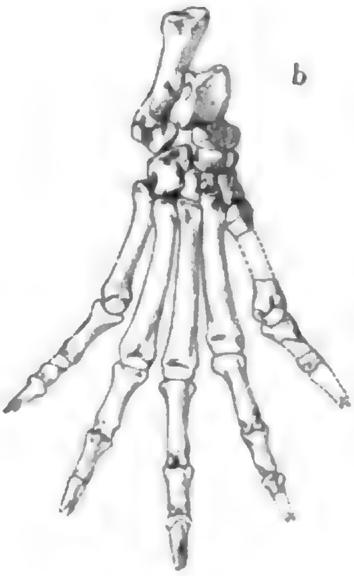


Fig. 17. †Limnocyon verus, Oberer Bridger. Wyoming. a Schädel, b rechter Hinterfuß. ½ natürlicher Größe. Nach W. D. Matthew.

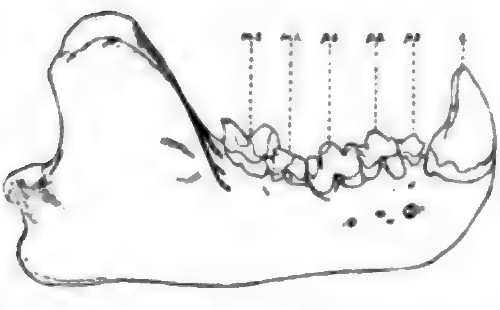


Fig. 18. Unterkiefer von †Patriofelis ferox, oberer Bridger, Wyoming. ¼ natürlicher Größe. Nach W. D. Matthew.

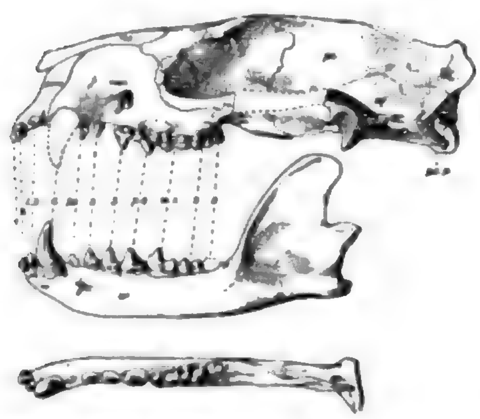


Fig. 19. †Vulpavus profectus, Unterer Bridger, Wyoming. ¼ natürlicher Größe. Nach W. D. Matthew.

Bridger) (Fig. 19), †Palaearctonyx (Bridger). Die zweite Unterfamilie der Miaciden sind die Viverravinae, welche zu den Viverriden hinüberführen. †Viverravus (Mittel- und Obereozän von Europa und Nordamerika) and †Didymictis (Torrejon, Wasatch, Wind River) sind die einzigen bekannten Gattungen der Viverravinae.

Wir sehen somit, daß sich die Stämme der Aeluroidea und der Arctoidea schon frühzeitig voneinander getrennt haben und daß die Spaltung beider Hauptstämme der Fissipedier bis in das Untereozän hinabreicht.

VII. Fissipedia. Systematik.

Die Fissipedia oder Carnivora vera sind in überwiegender Mehrzahl Räuber; nur wenige sind omnivor (z. B. Bären, Waschbären, Dachse). Mit Ausnahme der omnivoren Typen ist stets $\frac{P\,\underline{4}}{M\,\overline{1}}$ als Brechscherenapparat entwickelt. Hand und Fuß sind meist fünfzehig, Daumen und Großzehe sind selten verkümmert; Hand und Fuß sind paraxonisch. Die Bären sind ausgesprochen plantigrad und die Krallen in Hand und Fuß liegen beinahe in einer geraden Linie; fünfte Zehe und fünfter Finger sind bei den Bären am stärksten entwickelt. Von den Creodontiern unterscheidet sich das Handskelett der Fissipedier durch die Verwachsung des Centrale mit dem Intermedium und Radiale. Die Endphalangen sind spitz und zuweilen rückziehbar. Das Gehirn ist hoch entwickelt, groß und tief gefurcht. Die Bulla tympanica ist vollständig verknöchert, während dies bei den Creodontiern nur selten der Fall ist. Die Zähne werden gewechselt; die letzten Molaren unterliegen einer Reduktion, die bei den Feliden und Hyaeniden am weitesten vorgeschritten ist.

1. Tribus: Aeluroidea.

1. Familie: Felidae (Katzen).

1. Subfamilie: Felinae. Kerben der $\frac{P\,\underline{4}}{M\,\overline{1}}$ tief; Innenhöcker des $P\,\underline{4}$ gut entwickelt; obere Eckzähne schrittweise reduziert, untere vergrößert; Vorderkopf hoch, Processus mastoideus schrittweise verkümmert; $P\,\underline{3}$ groß, $P\,\overline{3}$ und $P\,\overline{4}$ fast gleich groß, Gliedmaßen verlängert, Zehen geschlossen, Großzehe schrittweise verkümmert.

2. Subfamilie: †Machairodontinae. Kerben der $\frac{P\,\underline{4}}{M\,\overline{1}}$ seicht; Innenhöcker des $P\,\underline{4}$ schwach; obere Eckzähne schrittweise vergrößert, untere verkümmert; Hinterkopf hoch, Processus mastoideus vorspringend, schrittweise vergrößert; $P\,\underline{3}$ sehr klein, $P\,\overline{3}$ rudimentär oder fehlend; Gliedmaßen robust, Zehen gespreizt, Großzehe groß, Daumen größer als bei den Felinen.

Die beiden Subfamilien stellen zwei divergent

entwickelte Stämme dar, von denen die †Machairodontinae oder „Säbelzahntiger“ gänzlich erloschen sind. Die aufeinander folgenden Entwickelungsstufen der beiden Stämme werden durch folgende Gattungen repräsentiert:

A. Felinae	B. Machairodontinae
Felis (Fig. 20, A3) (Pliozän bis Holozän) ←	→ †Smilodon (Fig. 20, B3) (Plistozän)
†Nimravus (Fig. 20, A2) (Oligozän bis Miozän) ←	→ †Machairodus) (Fig. 20, B2) (Miozän bis Pliozän)
†Dinictis (Fig. 20, A1) (Oligozän) ←	→ †Hoplophoneus (Fig. 20, B1) (Oligozän)

Gemeinsame Ahnen:
Miacidae.

Die Hauptentfaltung der †Machairodontinen fällt in das Pliozän und Plistozän. Im Pliozän waren verschiedene Arten der tigergroßen Gattung †Machairodus in Europa und Asien häufig; sie waren zweifellos die furchtbarsten Räuber unter den Carnivoren dieser Zeit. In Europa findet sich †Machairodus noch im Plistozän, hat aber hier den Höhepunkt seiner Entwickelung bereits überschritten. Dagegen entfaltet sich der äußerste Zweig des †Machairodontinenstammes in Nordamerika noch einmal in der Gattung †Smilodon zu hoher Blüte; †Smilodon wandert nach Südamerika aus und erlischt hier noch im Plistozän, wo es in †Smilodon neogaeum eine bedeutende Körpergröße erreicht.

Im Vergleiche mit der erloschenen Gruppe der Säbelzahntiger treten die echten Felinen während der Tertiärzeit stark in den Hintergrund. Erst im Pliozän werden sie häufiger; im Plistozän treten die ersten großen Katzen (Höhlenlöwe) auf.

2. Familie: Hyaenidae (Hyänen).

Ebenso wie bei den Katzen ist auch hier das Brechscherengebiß sehr gut ausgebildet und infolgedessen sind die hinteren Backenzähne hochgradig verkümmert. Das Gebiß ist zum Zerbrechen von Knochen vorzüglich geeignet, da die vorderen P in starke Kegelzähne umgeformt sind (nur der vorderste P bleibt oben und unten klein).

Die Hyänen stammen wahrscheinlich von den Viverridae ab; eine Gattung aus dem Unterpliozän Europas und Asiens, †Ictitherium, bildet das Bindeglied. Die Hyänen sind ausschließlich auf Eurasien und Afrika beschränkt geblieben. Die Höhlenhyäne der Eiszeit Europas ist eine Varietät der lebenden Hyaena crocuta (var. spelaea). Außerdem ist aber auch H. striata aus der Eiszeit Südeuropas bekannt. Die ersten echten Hyänen erschienen im Unterpliozän.

3. Familie: Viverridae (Zibethkatzen).

Die Viverriden stammen von den nordamerikanischen Viverravinae ab und sind seit der Auswanderung aus Amerika auf Eurasien und Afrika beschränkt geblieben. Echte Zibethkatzen treten erst im Obermiozän Europas auf (†Progenetta incerta); in unterpliozänen Ablagerungen Südeuropas und Asiens sind sie nicht selten. Die häufigste Gattung ist †Ictitherium (Pikermifauna Eurasiens).

2. Tribus: Arctoidea.

1. Familie: Mustelidae.

Die Marder spielen im Tertiär keine große Rolle. Die ältesten Musteliden, welche im Oligozän Nordamerikas und Europas auftreten, erinnern sehr an Viverriden, haben aber von echten Miacinen ihren Ursprung genommen. Bis jetzt unterscheidet man 34 fossile Mardergattungen, von denen 8 noch heute leben.

2. Familie: Ursidae (Bären).

Die ältesten Bären sind aus miozänen Ablagerungen Mitteleuropas bekannt; es waren kleine Formen von Wolfgröße, die in der Gattung †Ursavus vereinigt werden. Im Unterpliozän Eurasiens erscheint †Hyaenarctos; aus Nordamerika sind keine tertiären Bären bekannt. Erst im Plistozän Nordamerikas treten echte Bären auf (†Ursus americanus, †Ursus amplidens). Im Plistozän der Südstaaten, Kaliforniens, Alaskas und Südamerikas war †Arctotherium verbreitet.

Der Höhlenbär (†Ursus spelaeus) war das häufigste Raubtier der europäischen Eiszeit. Er ist mit dem braunen Bären nicht näher verwandt; sein Vorfahre war †Ursus Deningeri, der von †Ursus arvernensis (Oberpliozän) abstammt. †Ursus Deningeri ist dem lebenden Grizzlybären am nächsten verwandt.

3. Familie: Procyonidae (Waschbären).

Die Waschbären sind eine typisch amerikanische Arctoideafamilie, die zuerst (†Phlaocyon leucosteus) im Untermiozän von Colorado auftritt. Aus Europa sind nur dürftige Reste von †Parailurus bekannt, die im Red Crag von

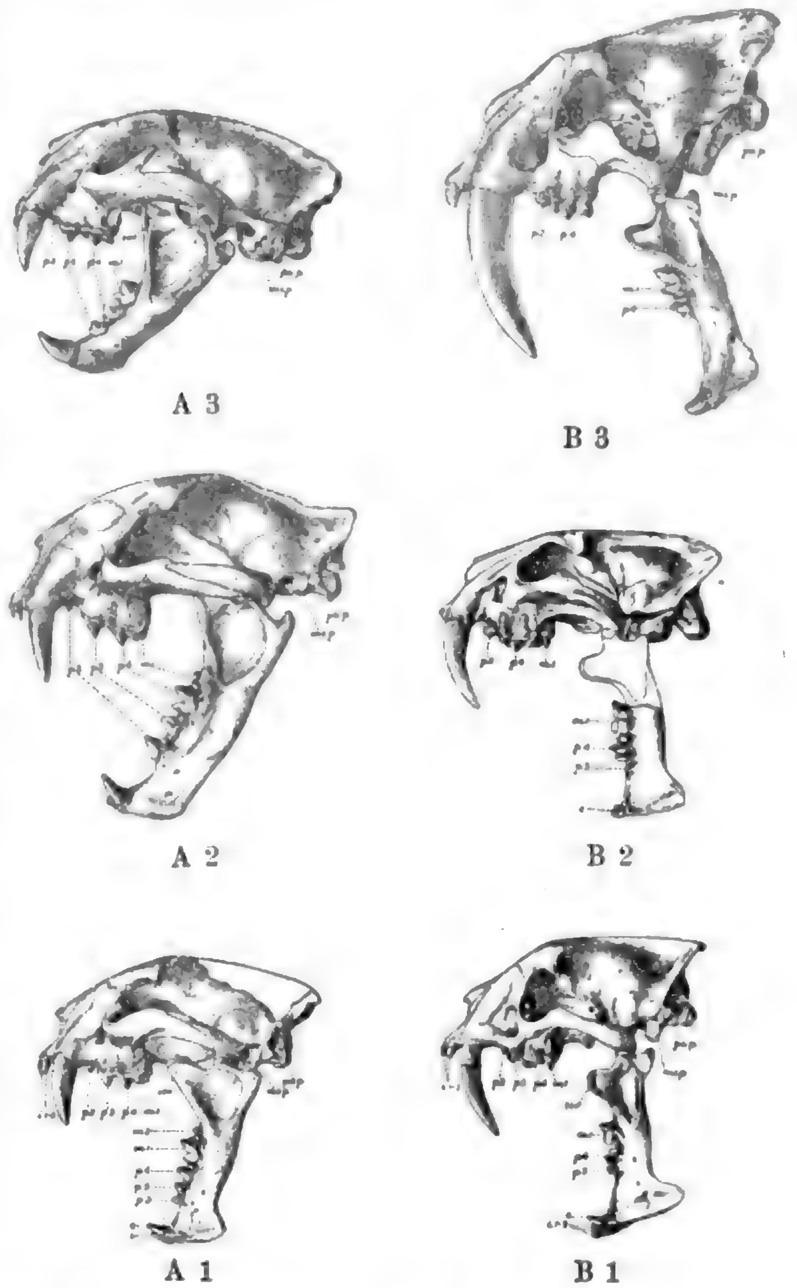


Fig. 20. Die Phylogenie der Felinen und Machairodontinen. A. Linke Reihe, von unten nach oben: **Felinae.** 1. †Dinictis squalidens, White River, Nordamerika. 2. †Nimravus gomphodus, John Day, Nordamerika. 3. †Felis concolor, Rezent. B. Rechte Reihe, von unten nach oben: **Machairodontinae.** 1. †Hoplophoneus primaevus, White River, Nordamerika. 2. †Machairodus palmidens, Miozän von Sansan, Frankreich. 3. †Smilodon californicum, Plistozän, Californien. Nach W. D. Matthew, 1910.

England und im Lignit von Baroth (Siebenbürgen) entdeckt wurden und welche die einzigen Anzeichen dafür bilden, daß zur Tertiärzeit einzelne Procyoniden auch nach Europa gelangten, wo sie indessen niemals festen Fuß gefaßt haben.

4. Familie: Canidae (Hunde).

Die Hunde stammen von Miaciden ab und haben namentlich im Gebiß altertümliche Züge und Aehnlichkeiten mit den Viverriden bewahrt. Die ältesten Hunde kennt man aus obereozänen Ablagerungen Europas; die Hauptentwickelung der Familie hat sich jedoch in Nordamerika abgespielt, wo sie im Oligozän und Miozän im Gegensatz zu Europa häufig waren. Von hier aus hat sich der Stamm der Caniden über die ganze Erde verbreitet. In Europa hat sich der erloschene Seitenzweig der †Amphicyoninae entwickelt, der auch im nordamerikanischen Tertiär Vertreter besitzt; im späteren Tertiär fällt auch die Entwickelung dieses Stammes auf amerikanisches Gebiet. Eine in Eurasien häufige, in Nordamerika seltene Gattung ist †Amphicyon, unter den nordamerikanischen ist der oligozäne †Daphaenus eine der wichtigsten Amphicyoninengattungen.

Die älteste Gruppe der Hunde wird durch die Unterfamilie †Cynodictinae repräsentiert, die einen viverrenartigen Habitus zeigen. Der eozäne †Cynodictis ist ein europäischer Vertreter dieser alten Gruppe. Von †Nothocyon (John Day) stammen die südamerikanischen Caniden der Gegenwart ab.

Die Unterfamilie †Cynodontinae umfaßt neben kleinen Typen auch bärengroße Formen. Die meisten Vertreter dieser Gruppe sind europäisch.

Die echten Hunde oder Caninae treten zuerst im Obermiozän von Nordamerika auf, scheinen sich aber von dort aus rasch verbreitet zu haben, da wir schon im Pliozän der Siwalikberge in Ostindien Vertretern der Gattung Canis begegnen, die im Oberpliozän in Europa erscheint und seither hier bodenständig geworden ist. Der älteste Fuchs (†Canis vafer) ist im Obermiozän Nordamerikas entdeckt worden.

VIII. Phylogenie der Fissipedier.

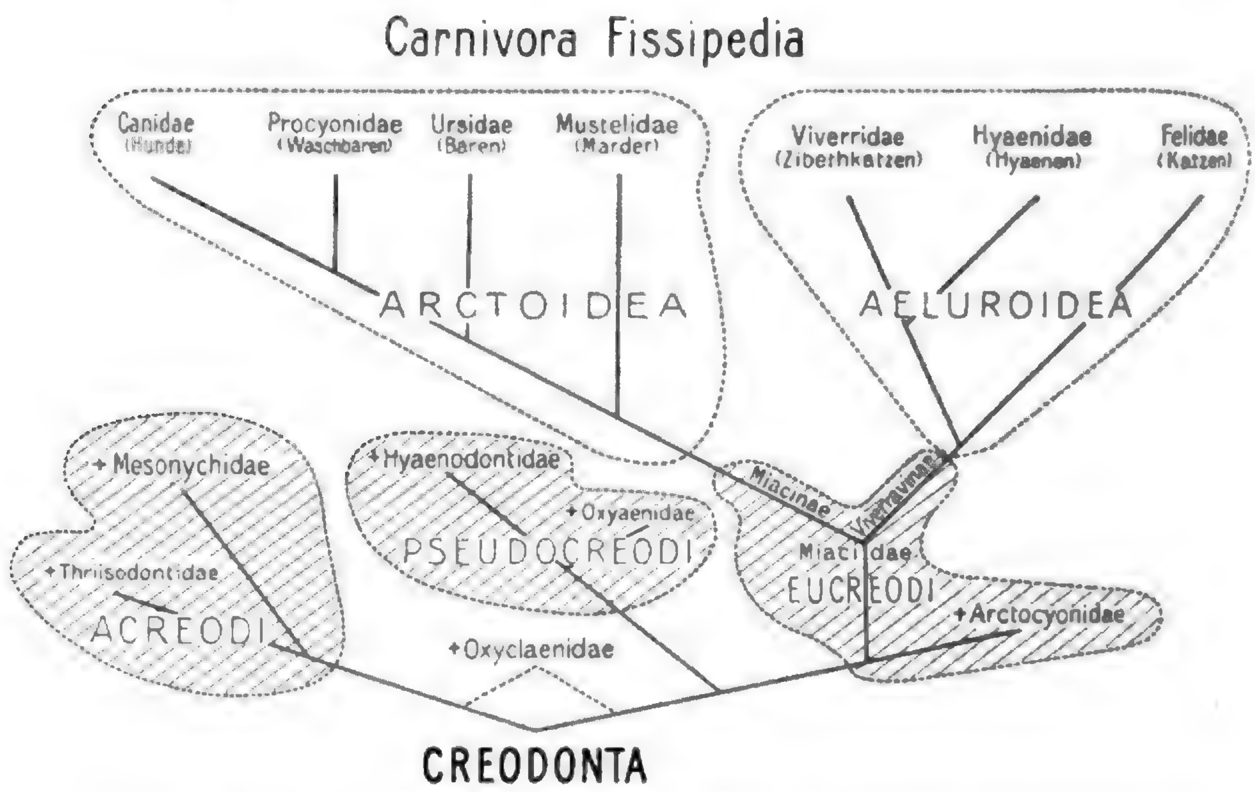
Die Vorfahren der Raubtiere müssen kleine, arboricole Tiere vom Aussehen der Beutelratten gewesen sein; erst spät verschwindet die Fähigkeit der Opponierbarkeit des Daumens und der Großzehe und ist bei dem arboricolen Wickelbär (Cercoleptes caudivolvulus) noch heute nicht ganz verloren gegangen. Hand und Fuß waren fünfzehig; das Gebiß war vollzählig $\left(\frac{3.1.4.3}{3.1.4.3}\right)$, ohne Ausbildung einzelner Zahnpaare zu Scherenzähnen, eine Anpassung an die Nahrungsweise, die erst später im Laufe der Geschichte der Creodonten und zwar auf verschiedenen Wegen erfolgte. Die Zahl der Rückenwirbel und Lendenwirbel ist ursprünglich 20 und diese Zahl bleibt bei allen Carnivoren mit sehr seltenen Ausnahmen

bestehen. Das Gehirn war klein und ungefurcht.

Frühzeitig spalten sich die primitiven Carnivoren in zwei verschiedene Anpassungstypen: die eine Formengruppe (z. B. †Arctocyonidae) bleibt arboricol und behält komprimierte, bisweilen retraktile Krallen, eine größere oder geringere Beweglichkeit von Großzehe und Daumen und leicht bewegliche Gliedmaßengelenke. Die zweite Gruppe (z. B. †Mesonychidae) wendet sich vom arborealen Leben dem terrestrischen zu, verliert dabei die Beweglichkeit von Großzehe und Daumen, die Krallen verlieren die Retraktilität, die Gelenke in Arm und Bein werden steifer.

Die Nachkommen der Creodontierahnen erscheinen schon am Anfange der Tertiärzeit in drei Stämme gespalten, die verschiedene Wege in der Anpassung an die räuberische Nahrungsweise einschlagen. Die erste Gruppe (†Hyaenodontidae) entwickelt als Brechzahnapparat $\frac{M\,2}{M\,3}$, die zweite (†Oxyaenidae) $\frac{M\,1}{M\,2}$, die dritte (†Miacidae), welche sich allein in die Fissipedier fortsetzt, $\frac{P\,4}{M\,1}$. †Oxyaenidae und †Hyaenodontidae zeigen mesaxonischen, die Miacidae paraxonischen Fußbau, der bei den Fissipediern erhalten bleibt. Die Miaciden behielten in der Mehrzahl das arboricole Leben während der Eozänzeit bei, doch treffen wir auch terrestrische Formen unter ihnen an. Aus den †Hyaenodontiden entwickeln sich im Laufe des Eozäns schnellaufende Formen vom Typus der Katzen und Hyänen, die bis in das Mitteloligozän andauern, um dann zu erlöschen. Aus ihnen haben sich sekundär amphibiotische Formen abgezweigt wie †Apterodon und wahrscheinlich haben die Archaeoceti oder Urwale von diesem Raubtierstamm ihren Ursprung genommen.

Von den Miaciden stammen die vielen terrestrischen Fissipedierfamilien ab. Die Miacinae führen zu den Mustelidae, Ursidae, Procyonidae und Canidae, die Viverravinae zu den Viverridae, Felidae und Hyaenidae. Heute sind die Fissipedier zum Teil noch arboricol wie viele Ursidae, die meisten Felidae, Procyonidae und zum Teil die Mustelidae; einige haben die Gewohnheiten amphibiotischer Tiere angenommen wie die Lutrinae; andere sind ausschließlich terrestrisch geworden wie die Canidae und Hyaenidae. Die Spaltung und Entwickelung der einzelnen Carnivorenstämme stellt sich nach den letzten Untersuchungen von W. D. Matthew folgendermaßen dar:



IX. Pinnipedia (Robben).

Diese Gruppe der Carnivoren ist wahrscheinlich aus Ursiden hervorgegangen. Fossile Pinnipedierreste sind sehr selten und die wenigen Ueberreste, die wir zuerst in miozänen Ablagerungen antreffen (Europa, Aegypten und Nordamerika) geben keinen Aufschluß über die Herkunft der Pinnipedier, da ihre Spezialisationen zu dieser Zeit des Tertiärs einen fast ebenso hohen Grad wie bei den lebenden Gattungen erreicht hatten. Wahrscheinlich haben wir drei schon von Beginn an getrennte Stämme zu unterscheiden, welche aus drei verschiedenen Stammgattungen entsprungen sind (ebenso wie die drei lebenden Flugbeutlergattungen aus drei verschiedenen Phalangeridengattungen entstanden sind). Reste von Phociden (Seehunden) kennt man aus dem Miozän Aegyptens Nordamerikas und Europas: in Wien wurden im sarmatischen Tegel von Heiligenstadt zahlreiche Reste gefunden (Phoca vindobonensis). Otariiden (Ohrenrobben) sind in dürftigen Resten aus dem Tertiär und Plistozän Nord- und Südamerikas bekannt. Fossile

Trichechiden (Walrosse) kennt man erst seit dem Pliozän Belgiens und aus jüngeren Schichten von Holland und Nordamerika.

V. Ordnung: Cetacea (Wale).

Die Geschichte der Wale darf nunmehr wenigstens in den Hauptzügen als geklärt betrachtet werden, seitdem in letzter Zeit auch die bisher ungelöste Frage der Herkunft der Bartenwale durch die Entdeckung eines Verbindungsgliedes zwischen den Archaeoceten und Mystacoceten entschieden wurde.

Bisher wurden die Archaeoceti (Urwale), Odontoceti (Zahnwale) und Mystacoceti (Bartenwale) als gleichwertige Unterordnungen der Wale nebeneinandergestellt. Da nunmehr die Archaeoceti als die Stammgruppe der Zahnwale (mit Ausschluß der Delphine?) und der Bartenwale zu betrachten sind, haben sich in der Systematik der Cetaceen die gleichen Schwierigkeiten wie in verschiedenen anderen Säugetierstämmen (z. B. Carnivoren, Ungulaten, Primaten) ergeben, wo wir gleichfalls an der Wurzel der divergierenden Familien eine einheitliche Stammgruppe zu unterscheiden haben, die sich nicht als „Unterordnung" den aus ihr entsprungenen Stämmen oder „Unterordnungen" gegenüberstellen läßt. Es ist daher die Gruppe der Archaeoceti ausdrücklich als „Stammgruppe" von den Stämmen der Bartenwale und Zahnwale zu unterscheiden.

Unter den Zahnwalen läuft ein Stamm bis zu den Archaeoceti zurück, während für eine große, heute in voller Blüte stehende Gruppe, die Familie der Delphiniden, noch immer der Anschluß an ältere Formen unaufgeklärt ist. Es empfiehlt sich daher, die Zahnwale in zwei Stämme zu teilen und den einen, sicher aus den Archaeoceti über die Squalodontiden hervorgegangenen Stamm als die Squaloceti von den Delphinoceti abzutrennen, welche nur die Delphiniden umfassen.

Die ältesten Archaeoceten schließen sich im Baue des Skelettes, Schädels und Gebisses enge an die Creodontier an und zwar kommen unter diesen als nächstverwandte Formen die †Hyaenodontiden in erster Linie in Betracht. Daß die Hyaenodontiden Formen enthalten, welche an das Wasserleben angepaßt waren, beweist die oligozäne Gattung †Apterodon, welche jedoch nicht als eine Ahnenform betrachtet werden kann, weil die ältesten Wale schon im Mitteleozän auftreten und sich sehr rasch spezialisiert haben.

Die Mystacoceti sind in vielen Merkmalen primitiver als die Squaloceti und Delphinoceti und schließen sich so enge an die Archaeoceti an, daß man im Zweifel sein kann, ob der älteste, bezahnte Bartenwal aus dem Oberoligozän Oberösterreichs (†Patriocetus) noch zu den Archaeoceten oder schon zu den Mystacoceten zu stellen ist.

Stammgruppe: Archaeoceti (Urwale).

Die Archaeoceten besaßen ein vollständiges oder der Zahl nach wenig reduziertes Gebiß mit mehrwurzeligen Molaren, die bei den spezialisierteren Formen zweiwurzelig werden. Die Oberkiefer grenzen in fast gerader Linie quer zur Schädelachse an die Stirnbeine und zeigen bei einigen spezialisierteren Formen die Neigung, die Stirnbeine zu unterschieben, während sich bei anderen die Oberkiefer über die Stirnbeine schieben. Die Nasenlöcher liegen weit vorne, der Schädel ist symmetrisch. Bei den primitiven Typen Zahnwechsel. Formel des definitiven Gebisses bei den primitiven Typen $\frac{3.1.4.3}{3.1.4.3}$. Halswirbel frei.

†1. Familie: Zeuglodontidae.

Aus dem unteren Mokattam von Kairo (Mitteleozän) ist †Protocetus atavus (Fig. 20) bekannt, welcher bei sehr primitivem Verhalten des Schädelbaues, Lage der Nasenöffnung, Gebiß usw. bereits Spezialisationen in der Reduktion der letzten oberen Molaren aufweist. Der obere $P\underline{1}$ ist der größte Backenzahn, C zweiwurzelig. Ueber †Eocetus (Mitteleozän Aegyptens) gehen die Protocetiden in †Zeuglod onüber.



Fig. 21. Schädel von †Protocetus atavus (Schädellänge 60 cm) aus dem Mitteleozän bei Kairo. Nach E. Fraas 1904.

†Zeuglodon (Fig. 22) aus dem Mitteleozän bis Obereozän Aegyptens, Europas und Nordamerikas stellt einen einseitig spezialisierten und im Miozän mit †Kekenodon (Neuseeland und Seymour-Insel) erlöschenden Seitenzweig der Archaeoceten dar. Die verschiedenen Arten von †Zeuglodon sind verschieden hoch spezialisiert; allen ist der Formenunterschied zwischen den unteren P und M gemeinsam, da die unteren P gezackte Vorder- und Hinterränder der Kronen besitzen, die unteren M aber nur am Hinterrande der schneidenden komprimierten Kronen ausgezackt sind. Im Oberkiefer sind P und M am Vorder- und Hinterrande gezackt und die oberen M reduziert (der letzte fehlt). Die hinteren Backenzähne stehen oben und unten dicht gedrängt, die vorderen sind infolge der Kieferverlängerung durch weite Zwischenräume getrennt. Die Nasenlöcher weiter nach hinten verschoben als bei †Protocetus. Bei einigen Arten sind die Lendenwirbel beträchtlich verlängert.

†Kekenodon ist der jüngste Ausläufer der Zeuglodontiden; aus dem Miozän Neuseelands sind Zähne und andere Reste bekannt. Die Wurzeln der Molaren liegen bei dieser Gattung enge aneinander und sind fast bis zu den äußersten Enden verschmolzen.

2. Familie: Microzeuglodontidae (Abel 1913).

†Microzeuglodon aus dem Oligozän (?) des Kaukasus und dem Eozän (?) von Südaustralien steht durch die Zackenbildung am Vorder- und Hinterrande der Backenzähne auf einer höheren

Stufe als †Protocetus, verhält sich aber darin primitiver, daß die hinteren Molaren durch Abstände getrennt und nicht rudimentär sind. In diesen oder ähnlichen Formen sind die Ahnen der jüngeren Cetaceenstämme zu erblicken, während die †Zeuglodontiden schon mit der ältesten Gattung †Protocetus einen gänzlich ausgestorbenen Seitenzweig der Cetaceen repräsentieren.

3. Familie: Agorophiidae (Abel 1913).

Während bei den Archaeoceten die Oberkieferknochen die Stirnbeinplatten über den Augenhöhlen nicht überschieben, ist dies bei allen Squaloceten und Delphinoceten der Fall. Eine Uebergangsform ist †Agorophius pygmaeus aus dem Alttertiär (Unteroligozän?) von Südkarolina. Hier sind die Zacken am Vorder- und Hinterrande der Molaren kleiner und weniger ausgeprägt als bei Zeuglodon; mit den älteren Archaeoceten hat †Agorophius (Fig. 23) den Bau der Schädelkapsel und des Schädeldaches gemeinsam, doch besteht ein wichtiger Unterschied in dem Fehlen eines Sagittalkammes und der stärkeren Neigung des Supraoccipitale nach vorn. Die Oberkiefer decken die Supraorbitalplatten nur zum Teile.

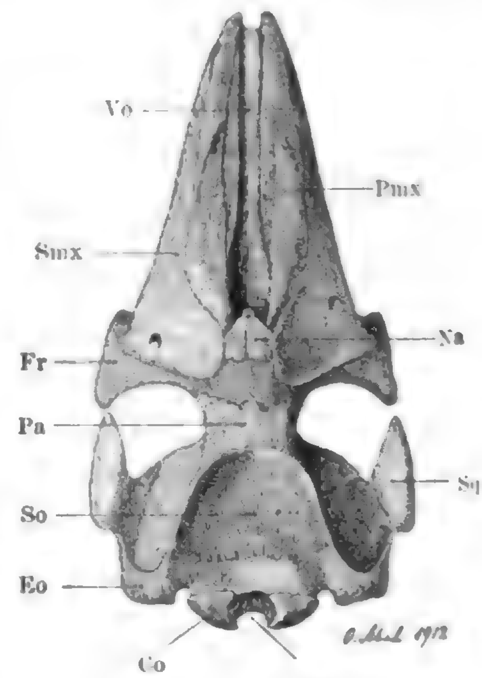


Fig. 23. Rekonstruktion des Schädels von †Agorophius pygmaeus aus dem Alttertiär von Südkarolina, Nordamerika. 1/4 natürlicher Größe. Mit Erlaubnis d. Kais. Akad. d. Wiss. in Wien einer im Druck befindlichen Abhandlung von O. Abel entnommen.

Während †Agorophius die Archaeoceten mit den Squalodontiden verbindet, steht †Prosqualodon (Fig. 24) aus dem Miozän Patagoniens abseits. Im Baue der Schädelkapsel nicht mehr so pri-

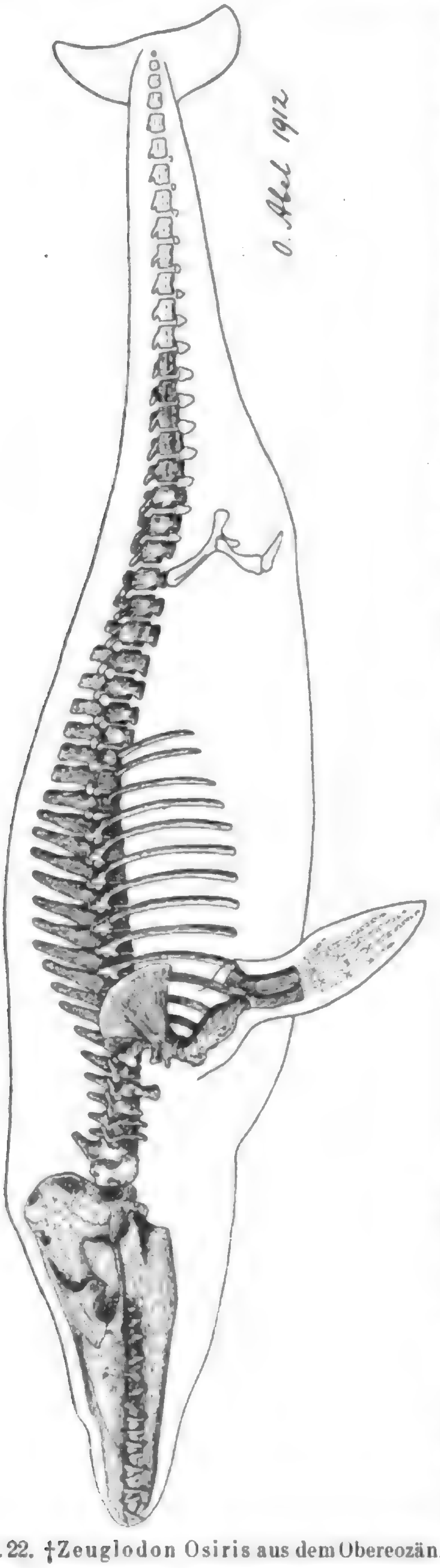


Fig. 22. †Zeuglodon Osiris aus dem Obereozän. Aegyptens. Ungefähr 1/16 natürliche Größe. Mit Erlaubnis der Kais. Akad. d. Wiss. in Wien einer im Druck befindlichen Abhandlung von O. Abel entnommen.

mitiv wie †Agorophius, aber noch nicht so spezialisiert wie †Squalodon, könnte man die Gattung für ein Bindeglied halten, wenn nicht

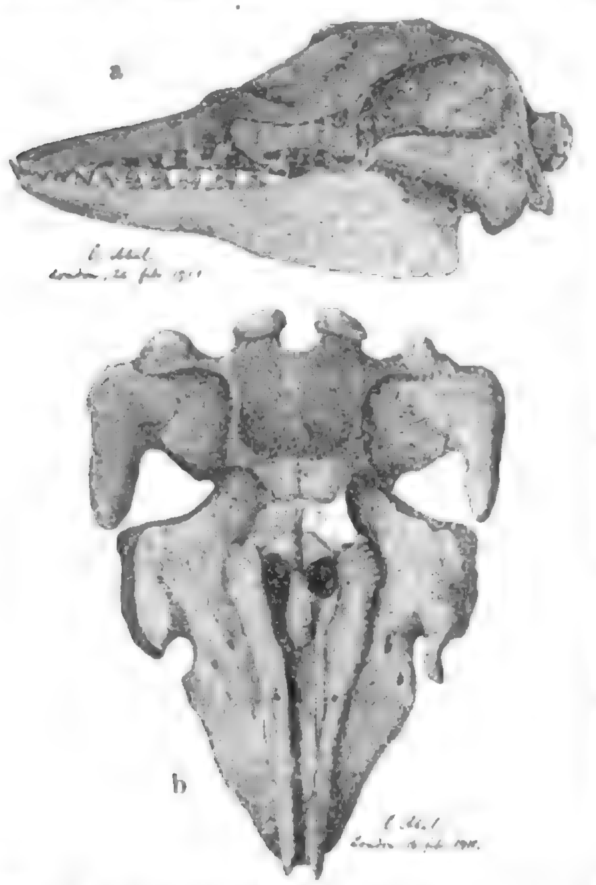


Fig. 24. Schädel von †**Prosqualodon australe** aus dem Miozän Patagoniens. Stark verkleinerte Rekonstruktion a von der Seite, b von oben. Nach O. Abel.

die Schnauze sekundär verkürzt und das Gebiß reduziert wäre. †Prosqualodon gehört offenbar einer erloschenen Seitenlinie an.

4. Familie: Patriocetidae (Abel 1913).

Die vermittelnde Stellung, welche †Agorophius zwischen Archaeoceten und Squaloceten einnimmt, besitzt †Patriocetus aus dem Oberoligozän von Oberösterreich zwischen den Archaeoceten und Mystacoceten (Fig. 25). Man kann †Patriocetus ebensogut als einen bezahnten Bartenwal wie als einen spezialisierten Archaeoceten bezeichnen. Ein vorzüglich erhaltener, fast vollständiger Schädel zeigt, daß die Oberkieferknochen die Supraorbitalplatten unterteufen, wie dies bei den Bartenwalen der Fall ist; die Nasenöffnung liegt etwas weiter vorne als bei Balaenoptera (Finwal); die Schädeldecke wird von einer breiten Platte gebildet, an deren Zusammensetzung die Frontalia und ein breiter Streifen der Parietalia teilnehmen; das Hinterhaupt ist tief ausgehöhlt; mit dem Petrosum verbindet sich ein großes, kolbiges Mastoideum wie bei den Bartenwalen; die Schnauze hat dreieckigen Umriß und ist auf der Unterseite fast flach. In den Kiefern stehen $\frac{3.1.4.3}{3.1.4.3}$ Zähne; die hinteren Molaren stehen nicht dicht gedrängt wie bei Zeuglodon; alle zweiwurzeligen Backenzähne (oben und unten 7) besitzen sieben Zacken (außer dem mittleren Hauptzacken je drei am Vorder- und Hinterrand). Die einwurzeligen Zähne haben mehr oder weniger konische Form. Bezeichnend ist eine Reduktion der Zähne insofern, als die hoch über den Alveolarrand herausragende Krone unterhalb ihrer Basis stark eingeschnürt ist und an dieser Stelle Resorptionen zu beobachten sind. Unterkiefer mit niedrigem Kronenfortsatz, Symphyse nicht verwachsen.

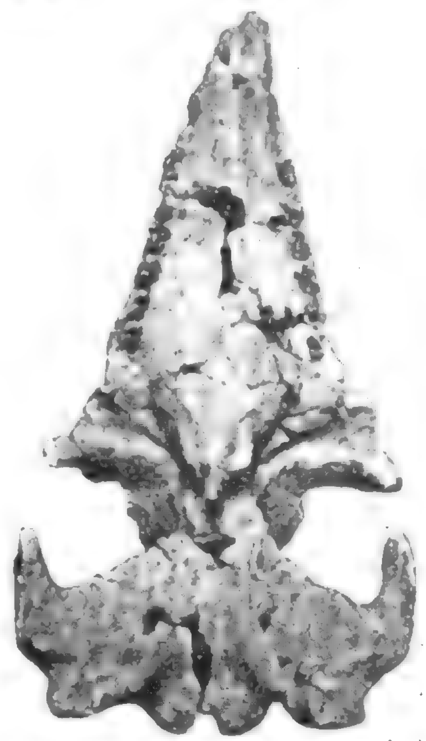


Fig. 25. Schädel von **Patriocetus Ehrlichi** aus dem Oberoligozän von Linz, Oberösterreich, von unten gesehen. Schädellänge 65 cm. Mit Erlaubnis d. Kais. Akad. d. Wiss. in Wien einer im Druck befindlichen Abhandlung von O. Abel entnommen.

†Patriocetus verbindet zweifellos die Archaeoceten mit den Bartenwalen, die in derselben Stufe wie †P. zum erstenmal auftreten.

Außer dem Schädel (†Patriocetus Ehrlichi) noch Wirbel bekannt, die vielleicht zu derselben Art gehören (†Patriocetus Denggi). †Agriocetus (nur durch ein Schädelfragment bekannt) steht Patriocetus sehr nahe, ist aber noch bartenwalähnlicher. Oberoligozän von Oberösterreich.

I. Unterordnung: Mystacoceti (Bartenwale).

Die Bartenwale besitzen keine funktionellen Zähne in den Kiefern. In frühen Embryonalstadien treten jedoch 53 Einzel„zähne" in jedem Kiefer auf; sind mehrere (bis vier) dieser Einzelzähne verschmolzen, so sinkt die Zahl der „Einzelzähne" herab. Da aber die Zahl der Spitzen stets 53 bleibt und die „mehrfachen Zähne" in den frühesten Embryonalstadien auftreten, so sind diese 53 Spitzen als die letzten Rudimente des Patriocetusgebisses zu betrachten, dessen Backenzähne in die sieben Spitzen zerfallen

(somit 3 Schneidezähne, 1 Eckzahn, 7 × 7 = 49 Backenzahnspitzen, Gesamtsumme = 53 Einzelspitzen).

Der Schädelbau der Bartenwale ist den Archaeoceten weit ähnlicher als den Zahnwalen und gekennzeichnet durch: Symmetrischer Bau; Supraorbitalflügel der Stirnbeine von den Supramaxillaria nicht überdeckt; Schläfengruben oben meist frei (Ausnahme z. B. Neobalaena); Unterkieferäste weit nach außen gebogen, nicht in einer Symphyse vereinigt. Halswirbel frei (Balaenopteriden) oder verschmolzen (Balaeniden). Hand fünffingerig (Balaeniden) oder vierfingerig (Balaenopteriden).

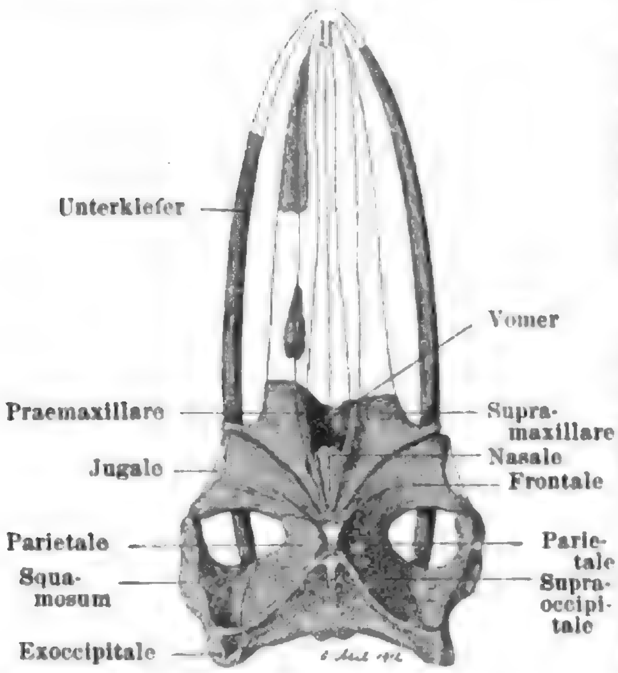


Fig. 26. †Cetotherium Rathkei, ein Balaenopteride aus dem Miozän Südrußlands. Rekonstruktion des Schädels, von oben, in $^1/_9$ der natürlichen Größe. Mit Erlaubnis d. Kais. Akad. d. Wiss. in Wien einer im Druck befindlichen Abhandlung von O. Abel entnommen.

1. Familie: Balaenopteridae (Furchenwale)

Die Balaenopteriden umfassen die primitivsten Gattungen der Bartenwale und schließen sich eng an die Patriocetiden an. Die ältesten Balaenopteriden neben ihren Stammgattungen im Oberoligozän von Oberösterreich (†Aulocetus); im Miozän ist †Cetotherium die häufigste Gattung. Im Obermiozän des Wiener Beckens (Sarmatische Stufe) treten sehr merkwürdige kleine Bartenwale auf, die von †Cetotherium abstammen und durch die hochgradige Pachyostose aller bekannten Skelettelemente (Wirbel, Rippen, Scapula) auffallen, wodurch sie an Sirenen erinnern. †Pachyacanthus repräsentiert einen eigenartig entwickelten, vielleicht kranken Seitenzweig des Cetotheriumstammes. Neben †Pachyacanthus ein unvollständig bekannter zwerghafter Furchenwal † Macrochirifer (Wirbel und Armskelett bekannt) im Obermiozän der Wiener Beckens. †Cetotherium ist im Miozän Europas weit verbreitet und auch aus Nord- und Südamerika bekannt. Die zahlreichen fossilen Gattungen und Arten der Balaenopteriden sind meist nur aus sehr ungenügenden Resten bekannt. †Plesiocetus im Pliozän Süd- und Mitteleuropas.

2. Familie: Rhachianectidae (Grauwale).

Diese Familie nimmt eine Mittelstellung zwischen Balaenopteriden und Balaeniden ein, ohne aber als phylogenetisches Bindeglied in Betracht zu kommen. Fossil noch nicht nachgewiesen, lebend Rhachianectes (Californische Küste).

3. Familie: Balaenidae (Glattwale).

Bereits im Miozän von den Balaenopteriden abgetrennt und einseitig spezialisiert. Die ersten echten Balaeniden erscheinen im Pliozän von Antwerpen, sind aber noch ungenügend bekannt und vielleicht Synonyme der lebenden Gattung Balaena (†Probalaena, †Balaenula, †Balaenotus). Die fossilen Balaeniden bedürfen ebenso wie die tertiären Balaenopteriden einer Revision.

II. Unterordnung: Squaloceti (Haizahnwale).

Aus den Agorophiiden hervorgegangen, haben die Haizahnwale schon im Miozän ihre Blüte erreicht und sind seit dem Pliocän im Niedergang begriffen. Bei allen sind die Oberkieferknochen über die Supraorbitalplatten der Stirnbeine geschoben, das Nasenloch weit nach hinten verlegt und die Schädelkapsel mehr oder weniger kuglig. Die Nasalia sind infolge der Verschiebung der Nasenöffnung nach hinten gegen das Schädeldach verkümmert; die Parietalia nehmen äußerlich nicht mehr oder nur in einem verschwindend kleinen Streifen an der Bildung des Schädeldachs Anteil und sind größtenteils auf die Temporalgruben herabgedrängt. Bei den ältesten Formen tritt eine Vereinfachung des Gebisses bei gleichzeitiger Vermehrung desselben im Prämolarenabschnitt ein, so daß z. B. †Squalodon eine Zahnformel von $\frac{3.1.9-8.\ 3}{3.1.\ 8.\ 3-2}$ besitzt. Niemals betrifft die Zahnvermehrung den Zwischenkiefer und nie den Molarenabschnitt. Kein Zahnwechsel mehr. Die Unterkiefersymphyse sehr lang.

1. Familie: Squalodontidae.

Zwischenkiefer, Oberkiefer und Unterkiefer bezahnt, Gebiß polyodont, Backenzähne am Vorder- und Hinterrand gezackt. Die hinteren Zähne dreiwurzelig, meist zweiwurzelig, die vorderen einwurzelig. Vordergebiß eine Art Fangrechen bildend.



Fig. 27. Rekonstruktion des Schädels von †Squalodon Bariense. Ca. $^1/_{20}$ natürlicher Größe. Zahnformel $\frac{3}{3}$ I $\frac{1}{1}$ C $\frac{8}{8}$ P $\frac{3}{3}$ M (O. Abel, 1905). Nach E. v. Stromer, 1910.

†Neosqualodon. Mittelmiozän Siziliens. Backenzähne zahlreich, die letzten zehn zweiwurzelig; außer der großen Hauptspitze am Hinterrand 3, am Vorderrand 2 große Zacken.

†Squalodon. Im Miozän Europas häufig, in Nordamerika seltener. Die letzten 7 bis 8 Backenzähne mehrwurzelig. Kiefer sehr langgestreckt, polyodont. Stammgattung der Physeteriden.

2. Familie: Physeteridae.

Bei den ältesten Gattungen Bezahnung vollständig und polyodont wie bei †Squalodon, aber die Zähne vereinfacht und durch Schwinden der Zackenreihen der Backenzähne sowie Aneinanderschließen der gespaltenen Wurzeln in konische, einwurzelige Zähne übergehend; später verlieren die Kronen die Schmelzkappe, es tritt eine rettigförmige Verdickung der Wurzeln und Verlust der Zähne zuerst im Zwischenkiefer, später auch im Oberkiefer ein, so daß bei den lebenden Gattungen Physeter und Kogia nur der Unterkiefer funktionelle Zähne trägt. Der Atlas bleibt frei, die übrigen Halswirbel verschmelzen zuerst (†Scaldicetus) bis zum sechsten (einschließlich), später wird auch der siebente in den Komplex miteinbezogen. Die Unterkiefersymphyse ist ursprünglich lang, später verkürzt sie sich immer mehr. Schädelkapsel stark asymmetrisch, sehr spezialisiert, Kiefer in der Praenasalregion eine weite Wanne zur Aufnahme einer fettigen Substanz bildend.

†Scaldicetus. Miozän und Pliozän von Europa, Nordamerika (Südkarolina, Virginien) und Südamerika (Chubut in Patagonien). 3 obere I; im ganzen 22 Zähne oben, 24 unten (†S. patagonicus). †S. Caretti ist eine Art von der Größe des lebenden Pottwals.

†Physeterula aus dem Obermiozän von Antwerpen, Deutschland (= Delphinus acutidens) und Ungarn (= Orca Semseyi) besaß schmelzlose Zähne im Ober- und Unterkiefer (jederseits 20, davon 12 in der Symphyse). †Prophyseter aus dem Obermiozän von Antwerpen hatte die Zähne im Zwischenkiefer verloren (nur in früher Jugend vorhanden), die noch beim jungen Tiere vorhandenen Oberkieferzähne waren beim erwachsenen Tiere bereits ausgefallen (†P. Dolloi).

†Placoziphius (Obermiozän von Antwerpen, Unterpliozän Norditaliens) hatte alle oberen Zähne bereits verloren.

Lebend Physeter und Kogia.

3. Familie: Acrodelphidae.

Aus den Squalodontiden hervorgegangen und im Miozän eine hohe Blüte erreichend. Aus den Acrodelphiden gingen die Ziphiiden hervor, welche im Gegensatz zu den Physeteriden eine Vorstufe mit sehr zahlreichen kleinen, dicht gedrängten, kegelförmigen Zähnchen im Ober- und Unterkiefer durchlaufen haben. Einen weiteren, aus Acrodelphiden entsprossenen Seitenzweig bilden die †Eurhinodelphiden. Die letzten lebenden Vertreter der Acrodelphiden sind einerseits Beluga (Weißwal) und der hochspezialisierte Monodon (Narwal), die fossil noch nicht bekannt sind, sowie Inia und Pontoporia aus südamerikanischen Flüssen und Flußmündungen. Platanista aus dem ostindischen Stromgebiet bildet einen aus den Acrodelphiden hervorgegangenen aberranten Seitenzweig.

Die Acrodelphiden besaßen ursprünglich ein sehr langes Rostrum, das nur beim Stamme der Beluginen verkürzt ist. Die einwurzeligen Zähne sind bei primitiveren Formen noch squalodonähnlich, später werden sie vereinfacht. Ihre Zahl kann bis auf 60 in jedem Kiefer steigen. Der Schädel ist sehr niedrig, die Schläfengrube in der Regel frei, das Supraorbitale viereckig, die Halswirbel frei. Lendenwirbel und vordere Schwanzwirbel in der Regel stark verlängert.

†1. Unterfamilie: Argyrocetinae.

Schädel sehr flach, Stirnbeine eine breite Platte auf dem Schädeldach bildend. Rostrum enorm verlängert, Zähne sehr zahlreich, mitunter noch mit Spuren von Heterodontie, locker in den Kiefern eingepflanzt und später rudimentär (†Ziphiodelphis Abeli).

†Argyrocetus. Miozän Patagoniens.

†Cyrtodelphis. Namentlich im Miozän Europas sehr häufig; auch im Miozän Aegyptens und Nordamerikas.

†Pontivaga. Paranien (Pliozän) von Argentinien.

†Ischiorhynchus. Ebenda.

†Champsodelphis. Miozän Frankreichs. Ungenügend bekannt.

†Ziphiodelphis. Miozän Italiens. Nur Schädelreste bekannt. Bezahnung rudimentär.

†2. Unterfamilie: Acrodelphinae.

Schädel flach, Stirnbeine schmal, Rostrum lang, Zähne meist mit kleinen Runzeln und Sekundärspitzen als Rudimente der Squalodonzacken.

†Acrodelphis. Im europäischen Miozän häufig.

3. Unterfamilie: Iniinae.

Lebend: Inia und Pontoporia. In Südamerika und Nordamerika im Miozän und Pliozän mehrere Gattungen (†Pontistes, †Saurodelphis, †Pontoplanodes (?), †Proinia, †Argyrodelphis in Südamerika, †Lophocetus in Nordamerika). Aus dem Tertiär des Kaukasus ein Schädelrest bekannt, der zu den Iniinen Beziehungen aufweist (†Iniopsis). †Pontistes schließt sich Pontoporia an.

4. Unterfamilie: Beluginae.

Fossil unbekannt. Lebend Beluga und Monodon.

5. Unterfamilie: Platanistinae.

Lebend Platanista; fossil unbekannt.

† 4. Familie: Eurhinodelphidae.

Rostrum enorm verlängert, bei einer Art (†Eurhinodelphis longirostris) $^{8}/_{11}$ der Schädellänge erreichend. Zwischenkiefer sehr zart gebaut, die Oberkiefer weit überragend, im vorderen Teil mit hochovalem Querschnitt, unbezahnt; Oberkiefer mit 37 bis 60 Zähnen; Unterkiefer kürzer als das Rostrum, den Oberkiefer nur wenig an Länge übertreffend. Schädeldach schwach konvex oder mit vom Supraoccipitale ähnlich wie bei Ziphiiden gebildeten Querkamm, Supraoccipitale oben gerundet, an die Frontalia stoßend. Alle Halswirbel frei, nur wenig komprimiert, Schwanzwirbel und Lendenwirbel auf-

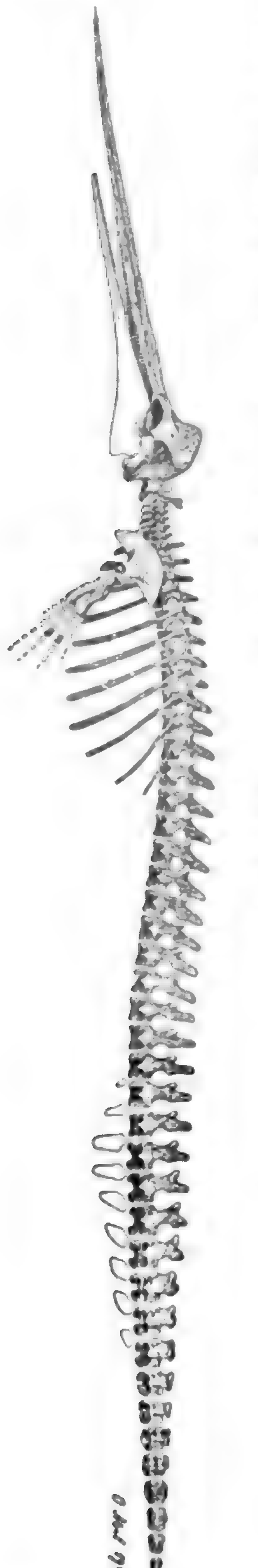


Fig. 28. Rekonstruktion des Skelettes von †Eurhinodelphis Cocheteuxi aus dem Obermiozän von Antwerpen. Körperlänge etwa 4 m. Nach O. Abel.

fallend groß. Wirbelformel: 7 cerv., 11 thor., 9 lumb., 3 sacr., 19 caud. Skelett fast vollständig bekannt (Fig. 28).

† Eurhinodelphis im Obermiozän Belgiens und Nordamerikas. Aus Antwerpen Reste von etwa 200 Individuen bekannt.

† Priscodelphinus im Miozän Nordamerikas.

5. Familie: Ziphiidae (Schnabelwale).

Bei den ältesten Formen, die sich enge an die polyodonten und homodonten Acrodelphiden anschließen, ist Zwischenkiefer (?), Oberkiefer und Unterkiefer bezahnt. Später gehen die Zähne langsam verloren, aber ein bis zwei Paar bleiben im Unterkiefer übrig, die als Waffen bei den Paarungskämpfen einzelner Arten eine Rolle spielen. Bei den miozänen Ziphiiden sind noch rudimentäre Alveolen sichtbar, bei den lebenden Gattungen nur mehr eine seichte Alveolarrinne, während die funktionslosen Zahnrudimente im Zahnfleisch liegen (z. B. Mesoplodon). Schädelkapsel stark asymmetrisch, sehr stark komprimiert („rhachimorph", Abel), mit hohem Querkamm, Nasalia hochgradig rudimentär. Oberkiefer in der Supraorbitalregion mitunter stark aufgetrieben, am stärksten bei Hyperoodon. Mitunter pachyostotische Veränderungen der Rostralknochen (Mesoplodon, †Choneziphius, Ziphius, Berardius, †Mioziphius); die Schnauzen manchmal mit verheilten Verletzungen, wahrscheinlich infolge von Paarungskämpfen (†Choneziphius); mitunter Exostosen auf der Oberseite des Rostrums (†Choneziphius). Die Rostralknochen verschmelzen untereinander zu einer kompakten Masse (Supramaxillare, Prämaxillare, Mesethmoid, Vomer); hierbei sexuelle und Altersdifferenzen. Atlas stets mit Epistropheus verwachsen, alle übrigen Wirbel frei. Erstes Auftreten im Miozän.



Fig. 29. Unterkieferfragment von †Mioziphius belgicus aus dem Obermiozän von Antwerpen. $^1/_3$ natürlicher Größe. Nach O. Abel.

†Palaeoziphius. Miozän von Antwerpen. Unterkiefer mit zwei an Größe überragenden Zahnpaaren (erstes und siebentes), alle Zähne funktionell. Primitivste Ziphiidengattung und Ahne der nächsten.

†Anoplonassa. Miozän (?) von Südkarolina. Vorderstes Zahnpaar (nur Alveolen bekannt) des Unterkiefers stark vergrößert, das hintere, kleinere etwas weiter vorn gerückt als bei Palaeoziphius. Nur diese beiden Zahnpaare funktionell, alle übrigen rudimentär. Symphyse sehr lang. Ahne der nächsten Gattung.

†Mioziphius (Fig. 29). Miozän von Antwerpen. Vorderstes Zahnpaar auf großen schüsselförmig vertieften Knochensockeln mit zentralem Knochenkegel, der schräge nach vorn sieht; hinteres Zahnpaar weiter nach vorn gerückt als bei †Anoplonassa. Sonst nur rudimentäre Alveolarrinne im Unterkiefer; Symphyse kürzer als bei den beiden vorhergehenden Formen. Im Oberkiefer 37 bis 48 rudimentäre Alveolen jederseits, dichtgedrängt. Zahlreiche gut erhaltene Schädelreste bekannt, meist Rostren (im ganzen Reste von 49 Individuen).

†Choneziphius. Obermiozän und Pliozän Europas und Nordamerikas. Rudimentäre Alveolen im Oberkiefer in wechselnder Zahl, höchstens 23 bis 25 dichtgedrängte, seichte Grübchen jederseits. Zwischenkiefer im Alter vollkommen verwachsen, in der Rostralregion pachyostotisch, und oben stark aufgetrieben, von der Nasenöffnung vollständig verwachsen, einen Kamm an der ehemaligen Trennungsstelle beider Zwischenkiefer bildend. Schädelkapsel sehr stark komprimiert, über der Nasenöffnung nach vorne überhängend.

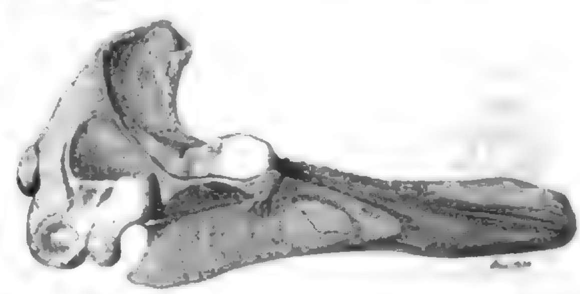


Fig. 30. Schädel von †Choneziphius planirostris aus dem Obermiozän von Antwerpen, rekonstruiert; von der Seite. In etwa $^1/_{10}$ natürlicher Größe. Nach O. Abel.

†Cetorhynchus. Miozän Europas. Nur Unterkiefer mit rudimentärer Alveolarrinne bekannt. Mesoplodon (lebend), fossil schon im Obermiozän Europas, im Pliozän auch in Nordamerika.

III. Unterordnung: Delphinoceti (Delphine).

Die Delphinoceti gehen nicht auf die Ahnengruppe der Squaloceti, die Squalodontiden zurück und es ist auch noch nicht gelungen, sie mit einer der bisher bekannten Archaeocetenformen in nähere Beziehungen zu bringen. Die ältesten Delphine des europäischen Miozäns sind bereits scharf von den Squaloceten verschieden. Rostrum stets kürzer als bei Squaloceten, Symphyse sehr kurz (nur bei Sotalia etwas länger), Zwischenkiefer zahnlos; Ober- und Unterkiefer mit wechselnder Zahl konischer einwurzeliger Zähne, nur bei primitiveren Gattungen mit kleinen Tuberkeln besetzt; bei den höchstspezialisierten Gattungen Oberkiefer zahnlos und die Unterkieferzähne auf das vorderste Ende beschränkt (Grampus). Schädelkapsel kugelig; Oberkiefer die Nasenbeine bei primitiveren Formen (†Pithanodelphis, †Delphinodon) hinten beinahe ganz umfassend, später reduziert; doch bleibt die Grube für diese Oberkieferverlängerungen seitlich vom Schädeldach auch bei spezialisierten Gattungen erhalten. Nasenbeine hochgradig rudimentär. Halswirbel ursprünglich frei, später in verschiedenem Grade verschmolzen. Aelteste Formen gepanzert, Panzerreste bei den Phocaenidae noch heute in größerem Ausmaß (Neomeris) erhalten. Die Delphine stammen wahrscheinlich von sehr kleinen Archaeoceten des Eozäns ab und bilden einen Stamm, der erst in der Gegenwart seine Blüte erreicht hat.

1. Familie: Phocaenidae (Braunfische).

Fossil vom Miozän an. †Delphinopsis. Obermiozän Kroatiens. Brustflosse gepanzert.

†Palaeophocaena. Miozän der Krim. Schließt sich an die lebenden Braunfische des Schwarzen Meeres an. †Protophocaena im Obermiozän von Antwerpen.

Neomeris (lebend) besitzt eine deutlich gefelderte Rückenhaut ohne Rückenflosse, die in länglich viereckige Felder geteilt ist, in deren Mittelpunkt ein Knochenkern als Rest der ehemals knöchernen Panzerung erhalten ist. Phocaena (lebend) besitzt knöcherne Tuberkeln in irregulären Hautfeldern am Vorderrande der Rückenflosse; auch die Brustflossen tragen am Vorderrande Knochentuberkeln.

2. Subfamilie: Delphinidae (echte Delphine).

Fossil vom Miozän an. †Pithanodelphis. Miozän von Antwerpen. Oberkiefer die Nasenbeine so weit umfassend, daß sie hinter ihnen beinahe zusammenstoßen. †Delphinodon, Miozän Nordamerikas, dürftige Reste auch in Europa; Oberkiefer nicht so weit genähert wie bei †Pithanodelphis, Symphyse sehr kurz. Zahnformel $\frac{27}{26}$. Alle Halswirbel frei. Aus dem Pliozän Italiens und dem Miozän Belgiens sind verschiedene Delphinidenreste bekannt, die größtenteils nicht näher bestimmbar sind. Aus dem Pliozän Italiens liegt ein Skelett eines Delphins vor, das Capellini als Orca citoniensis beschrieb, doch ist die Gattungsbestimmung sehr fraglich. Im Pliozän (Apscheronstufe) vom Ufer des Kaspisees gut erhaltene Reste von Delphinen in vulkanischen Tuffen.

VI. Ordnung: Xenarthra.

Die lebenden Xenarthra sind auf Südamerika beschränkt. Sie zerfallen in zwei scharf getrennte Stämme, I. die Anicanodonta (Myrmecophagidae, Bradypodidae) und II. die Hicanodonta (Dasypodidae). Die fossilen Gattungen aus dem Tertiär und Quartär Südamerikas sowie die von hier aus nach Nordamerika im Pliozän ausgewanderten Gattungen verteilen sich auf beide Gruppen; Zwischenformen, welche als Ahnen beider Stämme anzusehen wären, sind noch unbekannt.

Wortman hat mehrere Gattungen, die im Basaleozän Nordamerikas zuerst auftreten, dann auch in Europa erscheinen (nur ein Zahn von †Calamodon aus den Bohnerzen der Schweiz bekannt) und im Mitteleozän von Nordamerika erlöschen, als †Ganodonta zusammengefaßt und als die Ahnengruppe der Xenarthra bezeichnet. Zweifellos stehen diese Formen in verwandtschaftlicher Beziehung mit den Hicanodonta und Anicanodonta. Die engeren verwandtschaftlichen Beziehungen werden aber erst dann diskutiert werden können, wenn die Morphologie des Gebisses der Xenarthra geklärt sein wird. Bis jetzt gehen die Ansichten darüber auseinander, ob wir in dem großen, eckzahnförmigen, vordersten Zahnpaar der Gravigraden und der lebenden Bradypodiden einen modifizierten Prämolaren oder wirklich die Eckzähne zu erblicken haben. Im ersten Falle wäre eine Ableitung von den Ganodonta ausgeschlossen, im zweiten Falle möglich. Bis zur Klärung dieser wichtigen Frage des Gebisses der Xenarthra müssen die Ganodonta als selbständige Unterordnung unterschieden werden. Vollständig zahnlos sind nur die lebenden Myrmecophagiden. Allen Xenarthra fehlt mit Ausnahme der Ganodonta der Zahnschmelz, ist aber schon bei diesen zurückgebildet.

†I. Unterordnung: Ganodonta.

Schneidezähne reduziert, Eckzähne groß, Backenzähne mit geteilten Wurzeln; alle Zähne mit Schmelz bedeckt, aber Schmelzbelag an den Eckzähnen langsam verschwindend und schließlich nur auf dieser Vorderseite beschränkt, wodurch die Eckzähne nagezahnartig werden (besonders ausgeprägt bei †Calamodon). Zuerst im Basaleozän Nordamerikas; sie erlöschen im Mitteleozän.

†Onychodectes. Puerco. Primitivste Gattung; Backenzähne erhalten frühzeitig eine horizontale Kaufläche. Schädel langgestreckt.

†Conoryctes. Torrejon. Oberer letzter M rudimentär, ebenso die unteren $P_{\overline{1}}$ und $P_{\overline{2}}$ und die I. Schädel langgestreckt.

†Hemiganus. Puerco. Unterer C nur vorn mit Schmelzbelag; P und M mit geteilten Wurzeln; Schädel kurz.

†Psittacotherium. Torrejon. Schädel in seiner Gesamtform an †Megalonyx erinnernd. Unterer und oberer C nur vorn mit Schmelz

belag, P und M mit verschmolzenen Wurzeln, Schädel kurz (Fig. 31).

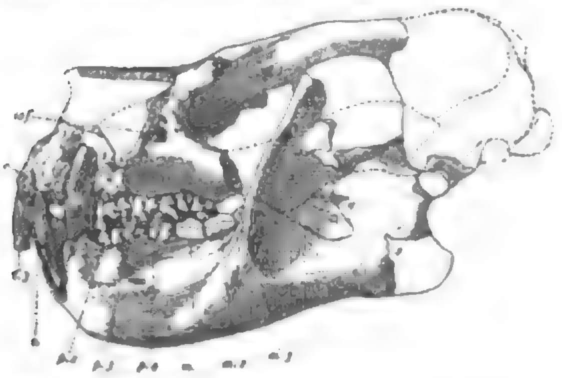


Fig. 31. Schädel von †Psittacotherium multifragum aus dem Torrejon von Neumexiko. $^{3}/_{8}$ natürlicher Größe. Nach J. L. Wortman.

†Calamodon. Wasatch und im Bohnerz von Egerkingen (hier nur ein Zahn). Nur Unterkiefer bekannt. Eckzahn stark gebogen, sehr lang, beständig wachsend, durchaus nagezahnartig. Molaren mit vier jochartig gestellten Höckern.

†Stylinodon. Bridger. Alle Backenzähne hypsodont.

II. Unterordnung: Anicanodonta.

†1. Familie: Gravigrada (Riesenfaultiere).

Die größten Xenarthra, die mit †Mylodon und †Megatherium Elefantengröße erreichen. Schwanz sehr kräftig, bei den bipeden Gattungen (†Megatherium, †Mylodon) als Stütze des Körpers dienend. Becken enorm vergrößert, den kegelförmigen Thorax bei den bipeden Formen wie eine Schüssel tragend. Hand- und Fußbau beweisen die Herkunft von grabenden Vorfahren mit einem ähnlichen Hand- und Fußbau wie die lebende Myrmecophaga. Haut mit isolierten Knochenkernen. Jüngere Gattungen herbivor, Schädel zuerst langgestreckt, später vorn abgestutzt und verbreitert.

†1. Unterfamilie: Megalonychinae.

Tetrapode Formen, die zuerst im Oligozän Südamerikas auftreten und im Miozän Patagoniens bereits häufig sind. Von älteren Gattungen sind †Hapalops und †Eucholoeops (Miozän von Santa Cruz) am besten bekannt (Fig. 32). Im Pliozän und Plistozän Nordamerikas ist †Megalonyx (Fig. 33) häufig. Bei allen Gattungen

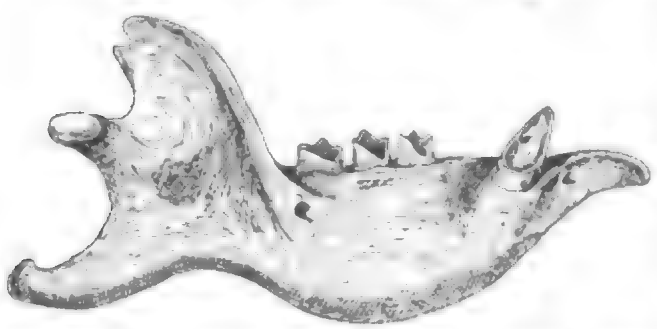


Fig. 32. Unterkiefer von †Eucholoeops externus aus dem Miozän von Santa Cruz in Patagonien. $^{1}/_{2}$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

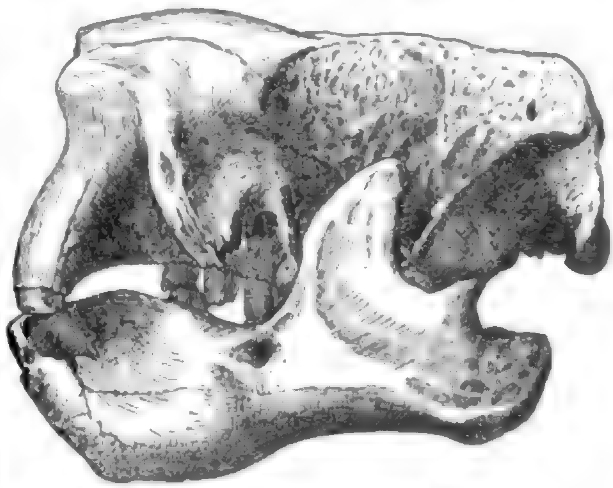


Fig. 32. Schädel von †Megalonyx Jeffersoni aus dem Plistozän von Kentucky, Nordamerika. $^{1}/_{4}$ natürlicher Größe. Nach J. Leidy.

fehlen die Schneidezähne; der vorderste Zahn ist durch eine große Lücke von den hinteren getrennt und funktioniert als Eckzahn (ob einem C homolog, fraglich). Letzter Zahn klein.

†2. Unterfamilie: Mylodontinae.

Ursprünglich tetrapod (†Scelidotherium, Plistozän Südamerikas), später biped (†Mylodon, ebenda). Im Miozän die ersten Gattungen. †Mylodon (Fig. 34) hat eine breit abgestutzte Schnauze; der Zwischenkiefer ist hochgradig verkümmert. Die Haut enthält viele Knochenkerne. Das Tier war biped. Die Zähne standen in geschlossener Reihe; der vorderste nicht durch Lücke getrennt und nicht vergrößert. Letzter unterer Backenzahn größer als die übrigen. †Mylodon kommt außer in der plistozänen Pampasformation auch im Oberpliozän und Plistozän Nordamerikas vor und scheint in Höhlen gehaust zu haben.

†Grypotherium aus dem Plistozän Südamerikas wurde noch vom Ureinwohner Südamerikas als Haustier in Höhlen gehalten (z. B. in der Höhle Eberhardt am Meerbusen von Ultima Speranza, Patagonien). Weitere Gattungen: †Paramylodon (Plistozän von Nebraska), †Lestodon, †Pseudolestodon, †Glossotherium im Plistozän Südamerikas.

†3. Unterfamilie: Megatheriinae.

Allgemeine Körpergestalt mylodonähnlich; †Megatherium war biped wie †Mylodon, aber überaus schwerfällig. Zahlreiche Arten, namentlich aus der plistozänen Pampasformation, aber auch aus dem südlichen Nordamerika bekannt. Die ältesten †Megatheriinen schon im Miozän von Santa Cruz.

2. Familie: Myrmecophagidae (Ameisenbären).

Fossil erst seit dem Plistozän bekannt. Einseitig hoch spezialisiert (z. B. im gänzlichen Verlust des Gebisses bei Myrmecophaga), zeigt der Ameisenfresser im Baue von Hand und Fuß

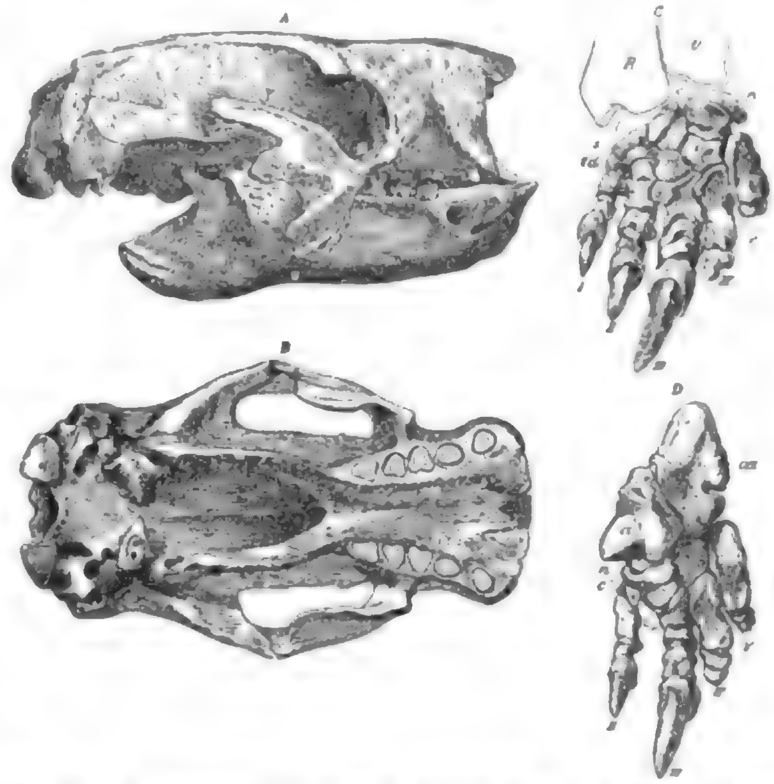


Fig. 34. A Schädel von rechts, B von unten, C Hand, D Fuß von †Mylodon robustum, aus dem Plistozän (Pampasformation) Argentiniens. 1/8 natürlicher Größe. Nach R. Owen.

sehr primitive Merkmale und gibt ein Bild vom Aussehen der ältesten Gravigraden. Gegenwärtig sind die Myrmecophagidae im Begriffe, zum arboricolen Leben überzugehen (Tamandua, Cycloturus).

3. Familie: Bradypodidae (Faultiere).

Erst seit dem Plistozän bekannt. Hochspezialisierte Formen, die von Grabtieren sekundär zu arboricolen Hängekletterern geworden sind. Bradypus, Choloepus, lebend in Brasilien usw.

III. Unterordnung: Hicanodonta (Gürteltiere).

Körper stets in einen knöchernen Panzer eingeschlossen, der bei den primitiveren Gattungen aus einzelnen gegeneinander verschiebbaren Ringen besteht, die bei den höchstspezialisierten Formen (†Glyptodontidae) zu einem unbeweglichen Rückenpanzer verschmelzen. Hand in Hand mit dieser Verschmelzung der Panzerringe geht eine weitgehende Verschmelzung benachbarter Wirbel zu unbeweglichen Komplexen. Insbesondere bilden die Thorakalwirbel einerseits und die Lenden- mit den Sakralwirbeln andererseits derartige Komplexe; bei den primitiveren Formen sind die Schwanzwirbel frei, verschmelzen aber bei jenen Gattungen zu einer unbeweglichen Masse, deren Schwanzwirbel in einer langen Röhre und nicht in Ringen eingeschlossen sind (†Hoplophorus, †Doedicurus, †Panochthus). Außerdem verschmilzt der 7. Halswirbel mit den 2 ersten Brustwirbeln sowie der 2., 3., 4., 5. und 6. Halswirbel zu je einem unbeweglichen Komplex. Das Schädeldach ist durch einen Knochenpanzer geschützt. Schädel sehr kurz, massiv, vorn abgestutzt, Unterkiefer sehr hoch und kurz, der fast alle Xenarthra kennzeichnende untere Fortsatz des Jochbogens sehr lang. Schneide- und Eckzähne fehlen, die Backenzähne sind prismatisch, bei den †Glyptodontidae durch zwei tiefe Quereinschnürungen in drei Pfeiler geteilt. Bei den Gürteltieren findet entweder eine erhebliche Vermehrung der Backenzähne statt (Priodon, lebend, mit 20—25 Zähnen in jedem Kiefer) oder eine Reduktion (z. B. †Stegotherium, Miozän von Santa Cruz, mit 5 bis 6 rudimentären Zähnchen im hintersten Abschnitt der sonst zahnlosen, langgestreckten Kiefer). Hand und Fuß bei den primitiveren Gürteltieren mit Grabkrallen, die bei den nicht mehr fossorialen †Glyptodontiden hufähnlich werden.

1. Familie: Dasypodidae (Gürteltiere).

Im ganzen primitiver als die Glyptodonten und zweifellos die Ahnengruppe derselben. Nur in Südamerika und (die lebende Gattung Tatusia) im südlichen Nordamerika. Im Miozän Patagoniens häufig. Bemerkenswert †Peltephilus (Santa Cruz-Schichten), dessen Kopfschild zwei Hörner trägt (F. Ameghino nahm zwei Hörnerpaare an), besitzt ein quergeteiltes Squamosum; der vordere Abschnitt desselben wurde von F. Ameghino mit dem Quadratum der Reptilien homologisiert.

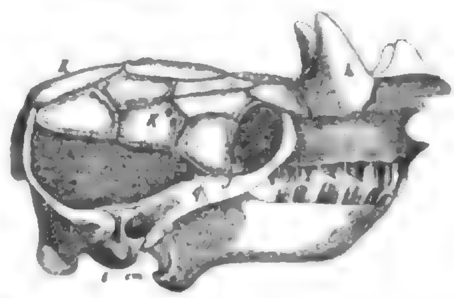


Fig. 35. Schädel von †Peltephilus ferox aus dem Miozän Patagoniens. 2/3 natürlicher Größe. q = (nach der Auffassung von F. Ameghino) Quadratum. Nach F. Ameghino.

†Stegotherium (Miozän, Santa Cruz) besaß einen langgestreckten Schädel mit stark reduziertem Gebiß, war also zweifellos myrmecophag, ohne daß es als der Ahne der Ameisenfresser betrachtet werden darf.

†2. Familie: Glyptodontidae.

Sie beginnen im Oligozän Argentiniens und erreichen im Plistozän Südamerikas den Höhepunkt ihrer Entwickelung. Sie sind auch nach Nordamerika ausgewandert, aber im Plistozän in der Neuen Welt erloschen. Die größten Formen

sind †Doedicurus (Länge etwa 4 m), †Glyptodon (Länge etwa 2 m) und †Panochthus (Nashorngröße). Bei †Glyptodon bestand der Schwanz-



Fig. 36. **Links:** obere linke Zahnreihe, **rechts:** untere rechte Zahnreihe von †**Glyptodon reticulatum**, Pampasformation (Plistozän) Argentiniens. $^{2}/_{3}$ natürlicher Größe. Nach H. Burmeister.

panzer aus beweglichen Stachelringen bei †Panochthus, †Hoplophorus und †Doedicurus war das Schwanzende in eine zylindrische, mit Hornkegeln besetzte Röhre eingeschlossen, während der vordere Schwanzabschnitt in bewegliche Ringe eingeschlossen war; so konnte die Schwanzröhre als Schlagwaffe nach Art eines mittelalterlichen Morgensterns benützt werden. Die miozänen Gattungen waren klein und besaßen niederere Unterkiefer, längere Schädel und schlankere Gliedmaßen.

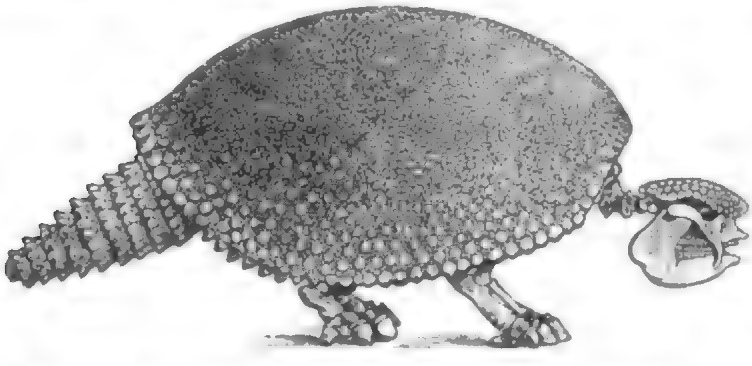


Fig. 37. Rekonstruktion von †**Glyptodon clavipes**, aus dem Plistozän (Pampasformation) von Buenos Aires; Länge etwa 2 m. Aus dem Guide to the Foss. Mamm. and Birds Brit. Mus. Nat. Hist. London 1909.

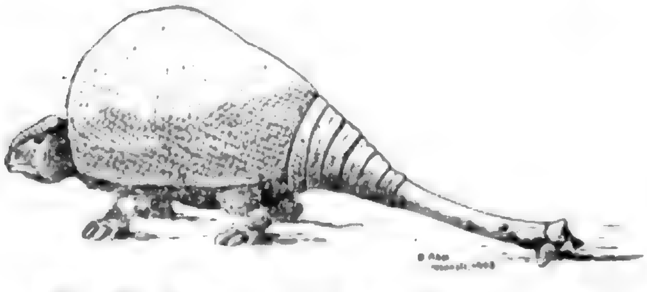


Fig. 38. Rekonstruktion von †**Doedicurus clavicaudatus** aus der Pampasformation von Buenos Aires. Körperlänge etwa 4 m. Nach O. Abel.

VII. Ordnung: Nomarthra.

In der Gegenwart ist diese Ordnung, die niemals eine größere Rolle gespielt hat, nur durch die Erdferkel (Orycteropodidae) und Schuppentiere (Manidae) vertreten. Die erste Familie ist seit dem Obereozän bekannt und zwar liegt von †Palaeorycteropus ein Humerus aus den Phosphoriten des Quercy vor; im Unterpliozän von Samos und Pikermi fanden sich Reste der noch heute lebenden Gattung Orycteropus. Die Manidae kennt man gleichfalls seit dem Obereozän; †Leptomanis und †Necromanis sind in den Phosphoriten des Quercy entdeckt worden, †Teutomanis und †Galliaetatus im Miozän von Solnhofen in Bayern (Spaltenausfüllung im Jurakalk). Vielleicht auch im Miozän Frankreichs. Die Nomarthra stellen einen von den Xenarthra durchaus verschiedenen Stamm dar, dessen Wurzeln bis jetzt noch nicht ermittelt worden sind.

VIII. Ordnung: Rodentia (Nager).

Wahrscheinlich sind die Nager schon frühzeitig aus primitiven Insectivoren hervorgegangen; sie haben sich in verschiedenen Richtungen hoch spezialisiert und namentlich der Bau der Backenzähne zeigt große Differenzen. Gegenwärtig steht der Stamm der Nager in voller Blüte; sie umfassen mehr als 900 lebende Arten und sind die einzige weltweite Säugetierordnung. Die ältesten Nagetiere erscheinen verhältnismäßig spät (erst im Wasatch und Bridger). Sie werden im Obereozän häufiger, erscheinen zu dieser Zeit auch in Europa und sind hier bereits im Oligozän ziemlich zahlreich vertreten. Im oberen Oligozän erscheinen die ersten Nager in Südamerika, doch sind sie wahrscheinlich schon zur Zeit der Abtrennung Nordamerikas von Südamerika im unteren Eozän in Südamerika einheimisch gewesen.

Vollständig erloschen sind folgende Unterfamilien: †Ischyromyinae (nur im Eozän und Oligozän Nordamerikas) vertreten, z. B. durch †Paramys); †Mylagaulinae (Miozän und Pliozän von Nordamerika, vertreten z. B. durch †Ceratogaulus, †Mylagaulus); †Protoptychinae (Obereozän Nordamerikas mit der Gattung †Protoptychus); †Theridomyinae (Eozän bis Untermiozän von Europa; wahrscheinlich die Ahnen der Stachelschweine); †Eomyinae (Oligozän von Europa und Nordamerika); endlich die †Issiodoromyinae (Oligozän Europas, vertreten z. B. durch †Nesokerodon). Alle genannten Unterfamilien gehören den **Simplicidentaten** an, die nur ein Paar obere Schneidezähne besitzen (im Gegensatz zu den frühzeitig abgetrennten **Duplicidentaten** mit zwei Paaren oberer Schneidezähne).



Fig. 39. Schädel eines gehörnten Nagers, Ceratogaulus rhinocerus, mit einem Hornpaare auf den Nasenbeinen. Aus dem Mittelmiozän von Colorado, Nordamerika. Natürliche Größe. Nach W. D. Matthew.

Superordnung: **Ungulata (Huftiere).**

IX. Ordnung: Protungulata (Stammgruppe der Ungulaten).

1. Familie: Mioclaenidae (? Ahnen der Artiodactyla).
†2. Familie: Periptychidae.
†3. Familie: Pantolambdidae (Ahnen der †Amblypoda).
4. Familie: Phenacodontidae (Ahnen der Perissodactyla).
†5. Familie: Meniscotheriidae (Ahnen der †Ancylopoda).
†6. Familie: Pleuraspidotheriidae.
†7. Familie: Bunolitopternidae (Ahnen der †Litopterna).

X. Ordnung: Artiodactyla (Paarhufer).

†1. Subordnung: Hypoconifera.
†1. Familie: Dichobunidae.
†2. Familie: Elotheriidae.
†2. Subordnung: Caenotheriidae.
†1. Familie: Caenotheriidae.
3. Subordnung: Euartiodactyla.
1. Superfamilie: Neobunodontia.
1. Familie: Suidae.
2. Familie: Hippopotamidae.
†2. Superfamilie: Bunoselenodontia.
†1. Familie: Anthracotheriidae.
†2. Familie: Anoplotheriidae.
3. Superfamilie: Selenodontia.
†1. Familie: Oreodontidae.
†1. Subfamilie: Agriochoerinae.
†2. Subfamilie: Oreodontinae.
†2. Familie: Xiphodontidae.
3. Familie: Camelidae.
4. Familie: Tragulidae.
1. Subfamilie: Tragulinae.
†2. Subfamilie: Gelocinae.
†5. Familie: Hypertragulidae.
6. Familie: Cervidae.
1. Subfamilie: Moschinae.
2. Subfamilie: Cervulinae.
3. Subfamilie: Cervidae.
†4. Subfamilie: Protoceratinae.
7. Familie: Giraffidae.
1. Subfamilie: Giraffinae.
†2. Subfamilie: Sivatheriinae.
8. Familie: Antilocapridae.
9. Familie: Cavicornia.
1. Subfamilie: Aegodontia.
Stämme: Neotraginae, Gazellinae, Rupicaprinae, Ovicaprinae, Ovibovinae.
2. Subfamilie: Boodontia.
Stämme: Cephalophinae, †Pseudotraginae, Bubalidinae, Hippotraginae, Cervicaprinae, Tragelaphinae, Bovinae.

†XI. Ordnung: Amblypoda.

†1. Familie: Coryphodontidae.
†2. Familie: Uintatheriidae.

XII. Ordnung: Hyracoidea.

1. Familie: Hyracidae.
†2. Familie: Saghatheriidae.

†XIII. Ordnung: Embrithopoda.

†1. Familie: Arsinoitheriidae.

XIV. Ordnung: Proboscidea.

†1. Familie: Moeritheriidae.
†2. Familie: Barytheriidae.
†3. Familie: Dinotheriidae.
†4. Familie: Palaeomastodontidae.
5. Familie: Elephantidae.
†6. Familie: Desmostylidae.

XV. Ordnung: Sirenia.

1. Familie: Halicoridae.
2. Familie: Manatidae.

†XVI. Ordnung: Pyrotheria.

†1. Familie: Pyrotheriidae.

†XVII. Ordnung: Notoungulata.

†1. Subordnung: Typotheria.
†1. Familie: Notopithecidae.
†2. Familie: Interatheriidae.
†3. Familie: Hegetotheriidae.
†4. Familie: Typotheriidae.
†2. Subordnung: Toxodontia.
†1. Familie: Acoelodidae.
†2. Familie: Notohippidae.
†3. Familie: Nesodontidae.
†4. Familie: Toxodontidae.
†3. Subordnung: Entelonychia.
†1. Familie: Notostylopidae.
†2. Familie: Isotemnidae.
†3. Familie: Leontiniidae.
†4. Familie: Homalodontotheriidae.
†4. Subordnung: Astrapotherioidea.
†1. Familie: Trigonostylopidae.
†2. Familie: Albertogaudryidae.
†3. Familie: Astrapotheriidae.

†XVIII. Ordnung: Litopterna.

†1. Familie: Macraucheniidae.
†2. Familie: Proterotheriidae.
†3. Familie: Adiantidae.

XIX. Ordnung: Perissodactyla.

1. Familie: Tapiridae.
†1. Subfamilie: Lophiodontinae.

2. Subfamilie: Tapirinae.
2. Familie: Rhinoceridae.
† 1. Subfamilie: Hyracodontinae.
† 2. Subfamilie: Amynodontinae.
3. Subfamilie: Rhinocerinae.
† 4. Subfamilie: Elasmotheriinae.
3. Familie: Equidae.
† 4. Familie: Titanotheriidae.
† 1. Subfamilie: Palaeosyopinae.
† 2. Subfamilie: Titanotheriinae.

† XX. Ordnung: Ancylopoda.

† 1. Familie: Chalicotheriidae.

Superordnung: **Ungulata** (Huftiere).

I. Systematik.

Der Gesichtspunkt, unter welchem zuerst von John Ray 1693 eine Säugetiergruppe unter dem Namen Ungulata vereinigt wurde, war der Unterschied im Baue der Endphalangen einzelner lebender Säugetiere im Vergleiche mit den übrigen. Diese als Ungulata (nach Ungula = Huf) abgetrennten Formen umfaßten nach Ray I. Die Solidipeda (Equus), II. Die Bisulca (Bos, Ovis, Capra, Cervus, Sus), III. Die Quadrisulca (Rhinoceros, Hippopotamus). Als Unguiculata (nach Unguicula = Kralle) wurden die Kamele, Elefanten, Gürteltiere, Maulwürfe, Mäuse, Ameisenfresser, Fledermäuse und Faultiere zusammengefaßt.

Die ersten systematischen Untersuchungen Linnés, die er 1735 veröffentlichte, führten zu einer Trennung der Nonruminantia (Nicht-Wiederkäuer) wie Equus, Hippopotamus, Elephas, Sus von den Ruminantia (Wiederkäuer), die der Ordnung: „Pecora" eingereiht wurden, während die Nonruminantia in die Ordnung „Jumenta" gestellt wurden. Später hat „Linné (in der 10. Ausgabe des „Systema naturae" 1758) folgende Gruppierung durchgeführt:

Ordnung Bruta: Elephas, Trichechus, Bradypus, Myrmecophaga, Manis.
Ordnung Bestiae: Sus, Dasypus, Erinaceus, Talpa, Sorex, Didelphis.
Ordnung Glires: Rhinoceros, Hystrix (und die übrigen Nagetiere).
Ordnung Pecora: Camelus, Moschus, Cervus, Capra, Ovis, Bos.
Ordnung Belluae: Equus, Hippopotamus.

Von dieser systematischen Gruppierung ist heute nichts mehr übrig geblieben. Seither hat eine große Zahl von Forschern sich mit der Gruppierung und Ordnung der Säugetiere beschäftigt, die unter dem Sammelnamen „Huftiere" bis vor kurzem vereinigt zu werden pflegten. Keine andere Gruppe der Säugetiere ist von den verschiedenen Systematikern so mannigfach gruppiert worden wie diese; William K. Gregory hat 1910 eine historische Uebersicht der verschiedenen systematischen Gruppierungen der Huftiere mitgeteilt.

Auch heute ist noch keine Einigung über die Systematik der Huftiere erzielt worden. Während die einen unter der Führung Gregorys die Paarhufer scharf von den übrigen Ungulaten getrennt halten, vereinigen sie Max Weber (1904) und Max Schlosser (1911) mit den Unpaarhufern in der Gruppe der Diplarthra. Auch über die Gruppierung und Trennung der übrigen Stämme gehen die Ansichten weit auseinander, je nachdem der eine oder andere Gesichtspunkt bei den morphologischen Vergleichen in den Vordergrund gerückt erscheint.

Diese Schwierigkeiten in der systematischen Anordnung der Huftiere sind durch die Entdeckung der überaus zahlreichen fossilen Formen beträchtlich gewachsen. Einerseits wurden durch die fossilen Formen Zusammenhänge aufgedeckt, die man früher kaum vermutet hatte, andererseits traten die Gegensätze zwischen einzelnen Stämmen noch schärfer hervor. Besondere Schwierigkeiten bereiten einer einheitlichen Systematik die verschiedenen erloschenen Stammesreihen, die sich selbständig und unter völligem Abschluß von anderen Entwickelungszentren der Tertiärzeit in Südamerika entfaltet haben.

Ohne Zweifel sind die Stämme, welche man als Huftiere im weitesten Sinne zusammenfassen darf, in ihrer Gesamtheit die Hauptmasse und die weitaus formenreichste Gruppe des ganzen Säugetierstammes. Mit außerordentlich seltenen Ausnahmen vom Beginne ihrer Entstehung an herbivor und nur mit Ausnahme der Sirenen terrestrisch geblieben — Ausnahmen bilden die amphibiotischen † Anoplotherien und Flußpferde — stellen sie in ihrer Gesamtheit den Kern der herbivoren, terrestrischen Säugetiere dar. Im Gliedmaßenbau und im Gebisse sind außerordentlich verschiedene und mannigfache Anpassungswege eingeschlagen worden, die in ihren Endpunkten zu so gewaltigen Gegensätzen wie Nashorn, Hirsch, Flußpferd, Gazelle, Elefant, Pferd, Seekuh und Kamel geführt haben, wozu noch die zahlreichen erloschenen Formen mit oft merkwürdiger Hörnerbildung wie † Arsinoitherium, † Brontotherium, † Titanotherium, † Sivatherium, † Protoceras usw. hinzutreten.

Die wichtigsten morphologischen Vergleichsobjekte bei der Gruppierung der Huftiere sind das Gebiß und der Gliedmaßenbau.

Das Gebiß der Ungulaten. A. Allgemeines.

Die Huftiere stammen zweifellos von Ahnen mit einem vollständigen Gebiß $\left(\frac{3.1.4.3}{3.1.4.3}\right)$ ab. Ebenso besteht keine Meinungsverschiedenheit darüber, daß die Zähne in dichter Folge standen und nur die P in etwas weiteren Abständen in die Kiefer eingepflanzt waren. Die Eckzähne waren ursprünglich jenen der ältesten Carnivoren ähnlich und wurden später bei den † Amblypoda und † Protoceratidae zu Hauern, gingen aber in den meisten Stämmen bei fortschreitender Anpassung an die reine Pflanzennahrung verloren. Nur wenige Huftiere (z. B. die Moschushirsche) besitzen noch funktionelle Eckzähne. Bei einer Gruppe, den Wiederkäuern, nehmen die unteren Eckzähne die Funktion und somit Gestalt und Größe der Schneidezähne an. Die Schneidezähne waren ursprünglich carnivorenartig geformt, formten sich aber bald zu Schaufeln oder Meißeln um; in einzelnen Gruppen, wie bei den Proboscidiern und Sirenen entwickelten sich ein oberes und unteres Schneidezahnpaar oder nur eines von beiden als Stoßzähne. Bei den † Notoungulaten Südamerikas erhalten die Schneidezähne bei nagerartiger Funktion den Typus von Nagezähnen, wobei sie jedoch von

vorne nach hinten und nicht wie bei Nagern seitlich komprimiert wurden; indessen ist bei dieser Gruppe nagender Huftiere niemals eine Kieferbewegung wie bei den echten Nagern ausgeführt worden, sondern die auf der Hinterseite schmelzlosen Schneidezähne des zweiten Paares schleiften auf der Vorderseite des vergrößerten dritten Schneidezahnpaares des Unterkiefers und nicht auf der Hinterseite des zweiten Schneidezahnpaares wie bei den simplizidentaten Nagetieren.

Die Backenzähne der Huftiere weisen einen außerordentlichen Formenreichtum auf. Mit wenigen Ausnahmen (jüngere Proboscidier und jüngere Sirenen) fand und findet bei allen Ungulaten ein Zahnwechsel statt. Hierbei werden die Schneidezähne, Eckzähne und Backenzähne des Milchgebisses mit Ausnahme der bleibenden drei Molaren (M_1 M_2 M_3) durch Schneidezähne, Eckzähne und „Prämolaren“ des Ersatzgebisses oder permanenten Gebisses ersetzt. Ursprünglich waren die Prämolaren von den Molaren formverschieden, während der hinterste Milchbackenzahn den gleichen Bau wie der ihm folgende Molar zeigt; erst später tritt eine Formveränderung in der Weise ein, daß die Prämolaren immer molarenähnlicher werden („Molarisierung“ der Prämolaren). Von dieser Regel gibt es nur insofern Ausnahmen, als in einzelnen Stämmen (Perissodaktylen) der vorletzte untere Milchbackenzahn komplizierter als die Molaren gebaut ist.

Ursprünglich waren die Backenzähne der Ungulaten niedrig („brachyodont“) und besaßen im Unterkiefer zwei, im Oberkiefer drei Wurzeln. Im Laufe der Stammesgeschichte teilte sich die breite Innenwurzel der oberen Molaren und die beiden Wurzeln der unteren Molaren, so daß vierwurzelige Zähne entstanden. In den verschiedenen Stämmen der

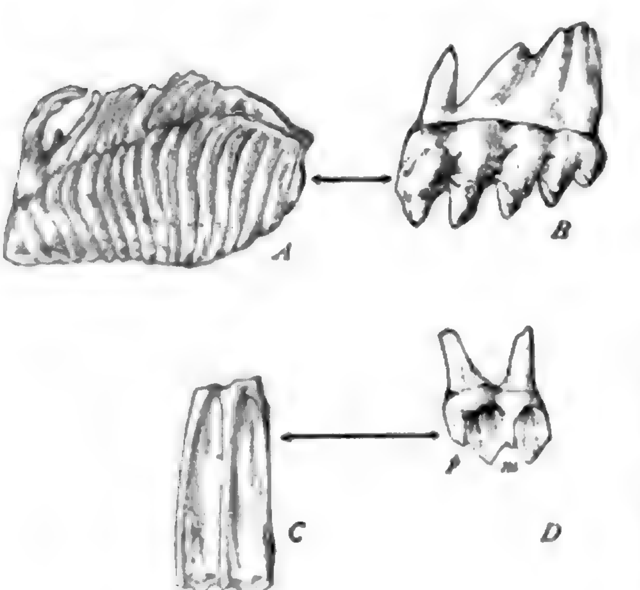


Fig. 40 A. Brachyodonte und hypsodont, Molarentypen der Ungulaten. A: hypsodont-hochkronig: †Elephas meridionalis. B: brachyodont, niedrigkronig: Mastodon americanum. — C: hypsodont, hochkronig: Equus caballus. — D: brachyodont, niedrigkronig: †Anchitherium aurelianense. Nach H. F. Osborn.

Ungulaten hat sich ferner beim Uebergang von weicher zu harter Pflanzenkost eine Erhöhung der Zahnkronen und Verlängerung der Wurzeln eingestellt, so daß die Backenzähne hochkronig („hypselodont“ oder „hypsodont“) wurden. Dieser Prozeß hat sich in den verschiedenen Stämmen ganz unabhängig von den anderen (z. B. Elefanten, Fig. 40 A, B und Pferde, Fig. 40 C, D) vollzogen und schließlich zur Ausbildung von säulenförmigen Zähnen geführt, deren Wurzeln lange Zeit nachwachsen und sich erst im höheren Alter schließen.

II. Differenzierung des Ungulatengebisses.

Die Endglieder der einzelnen Ungulatenstämme weisen außerordentliche Gegensätze im Baue der Zahnkronen auf. Wenn wir den oberen Backenzahn eines Pferdes mit dem eines Elefanten, eines Schweines, einer Gazelle, eines Nashorns usw. vergleichen, so bestehen so tiefgreifende Unterschiede, daß es zuerst kaum möglich erscheint, diese divergenten Typen auf einen einheitlichen Ausgangspunkt zurückzuführen. Die fossilen Vertreter der einzelnen Huftierstämme setzen uns jedoch in die Lage, die Geschichte der verschiedenen Formenreihen zurück zu verfolgen. Auf diese Weise hat sich ergeben, daß die Ungulatenahnen ein Gebiß besessen haben, das sich in den Grundzügen nicht wesentlich von dem Gebißtypus der ältesten Creodontier unterscheidet, so daß wir annehmen müssen, daß die heute rein herbivoren Ungulaten nach Durchlaufung einer sehr frühen omnivoren Stufe von carnivoren Placentaltieren abstammen.

Obere Molaren.

Der Ausgangspunkt, bis zu dem wir den Typus der oberen Molaren der Huftiere verfolgen können, ist ein niedrigkroniger Zahn, der drei in Dreieckform angeordnete Höcker oder Spitzen besitzt. (Fig. 45, A, B.) Man spricht daher entweder von einem trituberkulären (Cope) oder, mit Rücksicht auf die Anordnung der Spitzen in Dreieckform, von einem trigonodonten Molaren (nach Trigon = Dreieck. Terminus von Rütimeyer).

Die Molarenspitzen sind ursprünglich derart angeordnet, daß das Dreieck seine Spitze nach innen kehrt, so daß wir zwei Außenhöcker und einen Innenhöcker bei einem oberen Molaren zu unterscheiden haben. Der vordere Außenhöcker wird Paracon (pa), der hintere Außenhöcker Metacon (me), der gegenüberstehende Innenhöcker Protocon (pr) genannt.

Zwischen dem Protocon und dem vorderen Außenhöcker einerseits und dem Protocon und hinteren Außenhöcker anderseits entsteht später je ein Zwischenhöcker; der vordere wird Protoconulus (pl), der hintere Metaconulus (ml) genannt.

Aus diesen trigonodonten Molarentypus entstand nun bei den verschiedenen Huftierstämmen ein Typus, der durch einen sich immer mehr der Viereckform nähernden Kronenumriß gekennzeichnet ist. Wie W. G. Stehlin 1910 gezeigt hat, ist dieser aus dem trigonodonten oder triangulären Molaren hervorgegangene quadranguläre Molarentypus auf ganz

verschiedenen Wegen zustande gekommen und es ist außerordentlich wichtig, diese zu verfolgen, da wir auf diese Weise sichere Aufschlüsse über die phylogenetischen Beziehungen zwischen den einzelnen Stämmen erhalten.

Im Stamme der **Artiodaktylen** ist die Entstehung des quadrangulären Molaren auf drei verschiedenen Wegen erfolgt. Diese Wege sind folgende:

2. Gruppe der †Caenotheriidae.

Umformungsweg: Der Protocon rückt nach hinten, der Protoconulus wird stärker und rückt nach innen. Dadurch entsteht schließlich auf dem Wege über †Oxacron Courtoisi und †Caenotherium sp. der quadranguläre Molarentypus von †Caenotherium laticurvatum, der zwar dem Typus von †Dichobune oberflächlich gleicht,

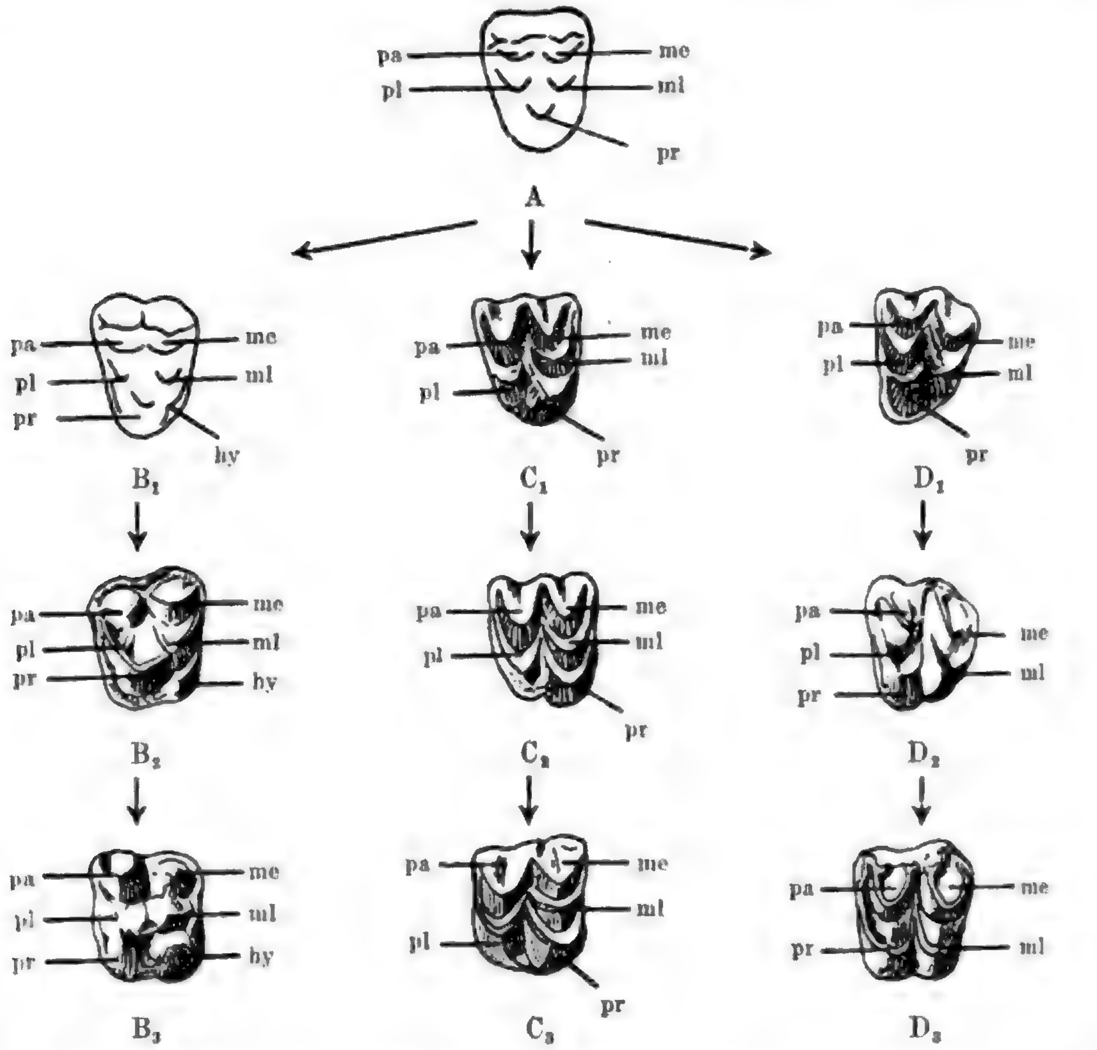


Fig. 41. Die drei verschiedenen Spezialisationswege der **Artiodaktylenmolaren**. A: die gemeinsame Ahnenform (Schematisiert). 1. Reihe: †**Hypoconifera**. B_1: primitive Dichobunidenform. — B_2: †Hyperdichobune nobilis. — B_3: †Dichobune leporina. 2. Reihe: †**Caenotheriidae**. C_1: †Oxacron Courtoisi. — C_2: †Caenotherium spec. — C_3: †Caenotherium laticurvatum. — 3. Reihe: **Euartiodactyla**. D_1: †Pseudamphimeryx Renevieri. D_2: †Dacrytherium ovinum. — D_3: †Dichodon cuspidatum. — pr = Protocon, pa = Paracon, me = Metacon, pl = Protoconulus, ml = Metaconulus. Nach H. G. Stehlin 1910.

1. Gruppe der †Hypoconifera.

Familie: †Dichobunidae und †Elotheriidae.

Umformungsweg: Der Protocon rückt etwas nach vorne, der Metaconulus wird kräftiger, an der Grenze zwischen beiden entsteht ein neuer Höcker, zuerst in Form einer kleinen Verdickung des Basalbandes (†Hyperdichobune nobilis), die später zu einem selbständigen Höcker oder **Hypoconus** (hy) erstarkt. Hier ist also zu den bestehenden Höckern ein neuer hinzugetreten, so daß auf diesem Wege die quadranguläre Krone von †Dichobune leporina entstand.

aber auf ganz andere Weise entstanden ist. Der Hypocon ist hier nicht zur Ausbildung gelangt; seine Stelle vertritt in physiologischer Hinsicht der Protocon.

3. Gruppe der Euartiodactyla.

Sämtliche übrige Artiodaktylen.

Umformungsweg: Der Protocon rückt nach vorne, der Metaconulus erstarkt (†Pseudoamphimeryx Renevieri) und rückt weiter nach hinten und innen (†Dacrytherium ovinum), bis die quadranguläre Form auch hier erreicht wird (†Dichodon cuspidatum).

Somit ergibt sich, daß die Rolle des hinteren inneren Haupthöckers des quadrangulären Artiodaktylenmolaren in der einen Reihe von dem neu entstandenen Hypocon, in der zweiten Reihe vom Protocon, in der dritten Reihe vom Metaconulus übernommen wurde.

Dieses Beispiel zeigt, wie vorsichtig man bei der morphologischen Analyse des Ungulatengebisses zu Werke gehen muß, um vorschnelle Identifizierungen der Höcker mit jenen des trituberculären Urtyps zu vermeiden.

Die Molaren sind ursprünglich von einem kräftigen, die Kronenbasis umziehenden Schmelzwulste, dem Basalband oder Cingulum umgeben, das häufig perlschnurartig gekörnt ist. Aus ihm entwickeln sich bei vielen Formen neue Schmelzhöcker (z. B. der Hypocon der Hypoconifera).

Bei manchen Ungulaten haben sich an der Außenwand der Molaren senkrechte Schmelzpfeiler entwickelt, die in einzelnen Stämmen (z. B. Pferde, Wiederkäuer, Litopterna, Titanotheriiden usf.) eine besondere Stärke erreichen. Der vorderste Pfeiler entsteht aus der vorderen Außenecke des Cingulums, lehnt sich an den Paracon an und wird Parastyl (ps) genannt. In der Mitte der Außenwand liegt der Mesostyl (ms), am hinteren Ende der Außenwand der sich an den Metacon anlehnende Metastyl (mts) (Fig. 45). Mitunter sind alle drei Außenpfeiler entwickelt, mitunter nur zwei (z. B. bei den Hirschen, wo nur Mesostyl und Parastyl auftritt), oder nur einer (z. B. Rhinoceros mit dem Parastyl, Fig. 97). Eine sekundäre Pfeilerbildung tritt in der Regel an den Molaren der Hirsche auf, wo an der Innenseite der oberen Molaren ein kegelförmiger Schmelzhöcker ausgebildet ist.

Hyracotherium (Fig. 42, A), einem Pferdeahnen aus dem Eozän Nordamerikas; außer den fünf vom trigonodonten Molaren übernommenen Höckern ist nur noch der Hypocon als Neuerwerbung hinzugetreten. Dies ist der oligobunodonte Molarentypus, dem als Endglied der bunodonten Anpassungsreihe die polybunodonten Molaren von Sus, †Tetrabelodon (Fig. 77, a) und †Metaxytherium gegenüberstehen. Die Neubildung der Höcker ist bei den Schweinen, Mastodonten und Sirenen teils am Hinterende der Molaren (nie am Vorderende), teils in den Tälern zwischen den ursprünglichen Haupthöckern erfolgt. Eine höchst eigenartige, extreme Spezialisation des bunodonten Molarentypus repräsentiert die Gattung †Desmostylus, die wahrscheinlich eine aberrante Proboscidierfamilie darstellt und aus dem Miozän von Japan und Kalifornien bekannt ist. Die Molaren sind hochgradig hypselodont und bestehen aus zahlreichen senkrechten Pfeilern.

b) Dem Höckerzahntypus steht der Jochzahntypus gegenüber (Fig. 42, c). Die Jochzähne oder lophodonten Molaren sind dadurch gekennzeichnet, daß sich zwischen den Haupthöckern Kämme ausbilden und die ursprünglich getrennten Höcker in diese Kämme einbezogen werden. Nun ist die Ausbildung lophodonter Molaren entweder derart erfolgt, daß sich nur quer zur Längsachse der Krone und senkrecht zur Kieferachse stehende Querjoche ausbilden; man spricht von einem Vorjoch (Protoloph) und Nachjoch (Metaloph), wenn nur zwei parallele Joche ausgebildet sind. Diesem Molarentypus begegnen wir z. B. unter den Rüsseltieren bei †Dinotherium, unter den südamerikanischen †Pyrotheria bei †Pyrotherium (Fig. 86). Bei vielen anderen Stämmen hat sich jedoch außer dem Vor- und Nachjoch noch ein Außenjoch (Ectoloph) entwickelt;

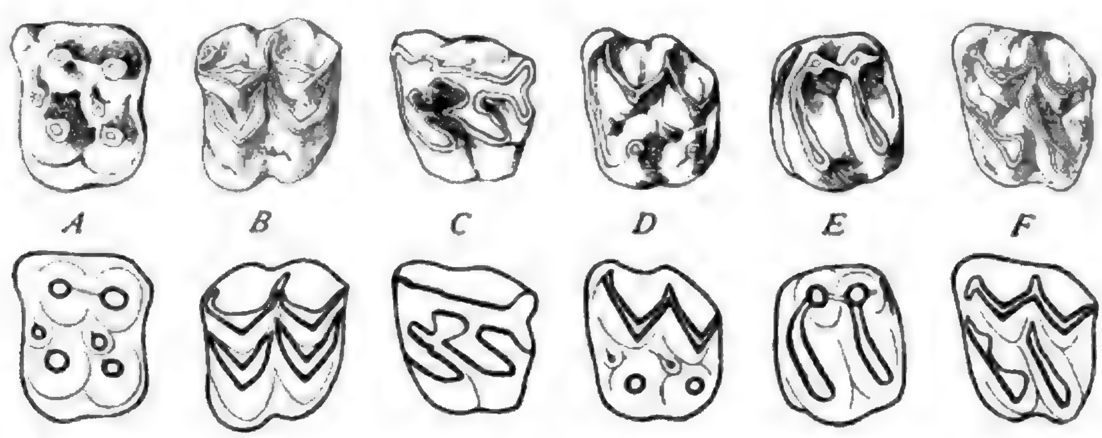


Fig. 42. Verschiedene Spezialisationswege der oberen Ungulatenmolaren. A bunodont: †Hyracotherium. — B selenodont: †Protoceras. — C lophodont: Rhinoceros. — D bunoselenodont: †Palaeosyops. — E lophobunodont: Tapirus. — F lophoselenodont: †Anchitherium. Nach H. F. Osborn.

Die Anpassung der Molaren an die verschiedene Nahrung — weiche oder harte Pflanzennahrung — hat zu einer außerordentlich mannigfaltigen Veränderung der Krone geführt. Je nachdem, ob saftige oder strohige Pflanzen als Futter dienen, verändert sich das Bild und die Struktur der Molarenkronen.

a) Der ursprünglichste Molarentypus ist der Höckerzahntypus (bunodonte Molaren). Zuerst sind nur wenige Höcker vorhanden, wie bei

Beispiele dieser Modifikation sind †Protapirus, †Lophiodon, †Hyrachyus (Fig. 97). Protoloph und Metaloph stehen meist nicht senkrecht zum Ectoloph, sondern treffen dasselbe unter spitzem Winkel.

Eine Abänderung des Jochzahntyps repräsentieren die oberen Molaren von †Coryphodon (Fig. 70). Der Protoloph verbindet hier Parastyl, Protoconulus und Protocon und steht sehr schräg zur Kieferachse; der zum Protoloph parallele

Ectoloph verbindet Paracon, Mesostyl und Metacon; ein Metaloph ist nicht zur Ausbildung gelangt, dagegen zieht eine Leiste vom Protocon gegen die hintere Außenecke des Molaren. Aus dieser Leiste entwickelt sich mitunter ein neuer Höcker (Hypocon). In morphologischer Hinsicht ist also der Molar von †Coryphodon von jenem der Tapire und Nashörner fundamental verschieden.

Die lophodonten oberen Molaren erfahren bei den Nashörnern eine stufenweise sich steigernde Komplikation. Im Quertal zwischen Protoloph und Metaloph entsteht in dem Winkel gegen den Ectoloph ein Kamm, der in das Tal vorspringt (Crista); vom Protoloph entwickelt sich gleichfalls eine ins Tal vorspringende Leiste (Antecrochet) und vom Metaloph in entgegengesetzter Richtung das Crochet (Fig. 42C). Bei jüngeren Rhinocerotiden kommt es mitunter durch Verschmelzun von Crista und Crochet zur Abschnürung einer trichterförmigen Grube (Prefossette), während sich zwischen dem Metaloph, Ectoloph und der Hinterwand des Zahns durch Ausbildung einer Leiste die Postfossette schließt. Endlich entstehen in den Tiefen der Täler und Fossetten Zementschichten, welche ebenso wie die sekundären Sporne die Aufgabe haben, einer zu raschen Abnützung der Molaren Widerstand zu leisten.

Den bisher genannten lophodonten Typen, die man als oligolophodont bezeichnen kann, steht der polylophodonte Elefantenmolar gegenüber (Fig. 40A), bei welchem die Jochzahl an einzelnen fossilen Typen wie †Mammut auf 27 steigt. Diese Joche sind als dünne Lamellen entwickelt, deren Zwischenräume mit Zahnzement ausgefüllt sind, wodurch die Widerstandskraft des Zahns gegen eine vorzeitige Abnützung gesteigert wird.

c) Der dritte Haupttypus der oberen Ungulatenmolaren ist der selenodonte (Fig. 42 B). Er geht wie die übrigen Typen auf den trigonodonten Typus zurück. Daß der quadranguläre Artiodaktylenmolar nicht auf einen quadrituberkulären Typus (Protocon, Paracon, Metacon, Hypocon) zurückgeht, sondern auf den triangulären trituberkulären Typ, dem der Hypocon fehlt, wurde schon früher erörtert. Die Haupthöcker Zwischenhöcker des Ausgangstyps haben sich bei den verschiedenen Paarhuferstämmen derart differenziert, daß die Höcker durch Ausbildung divergierender Kämme die Gestalt eines V und später die eines Halbmondes erhielten, der eine mondsichelförmige Abnützungsfläche aufweist.

d) Diesen Typen schließt sich ein Mischtypus an, der als „bunoselenodonter“ Molarentypus bezeichnet wird (Fig. 42 D). Bei diesen Molaren ist zwar ein Ectoloph entwickelt, aber es fehlen Protoloph und Metaloph; aus ihrer Stelle sind entweder Protoconulus, Protocon, Metaconulus und Hypocon als niedrige Höcker ausgebildet oder nur einige derselben. Diesen Typus repräsentiert z. B. †Palaeosyop (Familie †Titanotheriidae); bei anderen bunoselenodonten Typen sind sehr schwache Querjoche ausgebildet, neben ihnen jedoch ein großer, niedriger, konischer Innenhöcker (†Chalicotheriidae).

e) Ein weiterer „Mischtypus“ sind die lophoselenodonten (Fig. 42 F) Molaren einiger Ungulatenstämme. Ein Beispiel dieses Molarentyps bieten uns die jüngeren Equiden. Ihre oberen Molaren zeigen eine auffallende Aehnlichkeit mit denen der Boviden; indessen handelt es sich hier nur um konvergente Anpassungen und nicht um eine Homologie der Struktur.

Untere Molaren.

Der untere Molar der Ungulaten ist vom trituberkulär-sektorialen Molarentypus der primitiven Placentalier abzuleiten, der einen Außenhöcker-Protoconid (prd) — sowie zwei Innenhöcker, den vorderen — Paraconid (pad) und hinteren — Metaconid (med) besitzt. (Fig. 45, c). Dies wäre ein Spiegelbild der oberen Trituberkulärzähne, wenn nicht am Hinterende des Unterkiefermolaren noch ein Anhang, das Talonid als Antagonist des Protocon vorhanden wäre. Bei dem sehr primitiven †Creodontier †Trisodon aus dem Puerco ist aus dem Talonid ein zweiter Außenhöcker, das Hypoconid (hyd) entstanden, so daß der Unterkiefermolar funktionell quadrituberkulär ist. Später entwickelten sich aus dem Talonid, das niedriger war als das alte Trigonid, zwei weitere Höcker und zwar eine unpaare Spitze am Hinterende, das Mesoconid (msd), auch Hypoconulid genannt, und eine hintere Innenspitze, das Entoconid (end), mitunter auch Entoconulid genannt. (Fig. 44).

Bei den bunodonten Huftieren ist der Unterkiefermolar vielhöckerig und zwar fehlt das Paraconid.

Bei den lophodonten Unterkiefermolaren werden, wenn nur zwei Querjoche entwickelt sind, das vordere als Metalophid, das hintere als Hypolophid bezeichnet. Tritt am Hinterende ein drittes Joch auf (z. B. bei †Titanotherium) so bezeichnet man dasselbe als Hypoconulid, auch wenn es als deutlicher Querkamm und nicht als Höcker ausgebildet ist (Fig. 97).

Superordnung: Ungulata (Huftiere).

IX. Ordnung: Protungulata (Stammgruppe)

Der älteste und primitivste Stamm der Ungulaten, den wir in der „Ordnung“ Protungulata zusammenfassen, geht ohne Zweifel auf insectivorenähnliche Raubtiere der obersten Kreide zurück. Wenn wir die verschiedenen Familien der Miclaenidae, †Periptychidae, †Pantolambdidae, Phenacodontidae, Meniscotheriidae, †Pleuraspidotheriidae und †Bunolitopternidae zusammenfassen und untereinander vergleichen, so sehen wir, daß zwar zwischen diesen verschiedenen Stämmen Gegensätze bestehen, daß sich aber alle zu einer systematischen Einheit zusammenschließen, während die nächstverwandten †Amblypoda, die als die Nachkommen der †Pantolambdidae betrachtet werden (E. D. Cope 1884, Max Schlosser 1911) schon einen höher spezialisierten Seitenzweig darstellen. Die Meinungen über die verwandtschaftlichen Beziehungen der Protungulatenfamilien untereinander und zu den Amblypoden sind außerordentlich divergent und daraus erklärt sich auch, daß noch keine Einigkeit in der systematischen Anordnung dieser Familien erzielt worden ist.

Aus diesem Grunde wird es auch zweckmäßig sein, von der Teilung der fünf genannten Fa-

milien in zwei oder mehr Gruppen, wie in die †Taligrada und †Condylarthra, solange abzusehen, bis die phylogenetischen Beziehungen besser geklärt sind, als dies heute der Fall ist; daher wollen wir die sechs Familien unter dem Sammelbegriff der Protungulata vereinigen.

Die Schwierigkeit der Klassifikation dieser primitiven Ungulatenfamilien ist darin begründet, daß die Gegensätze unter ihren Angehörigen noch nicht sehr scharf ausgeprägt sind und daß es darum außerordentlich schwer ist, die richtigen Anschlüsse an die jüngeren Stämme zu ermitteln. Mit allem Nachdrucke ist aber zu betonen, daß die „Ordnung" der Protungulata keineswegs anderen Ordnungen der Ungulaten (beispielsweise der „Ordnung" der Perissodactyla, Proboscidea, Artiodactyla usw.) gleichwertig ist. Die geschlossenen Hauptordnungen der Huftiere sind in chronologischer und phylogenetischer Hinsicht vertikal abgegrenzt, ebenso wie die einzelnen „Familien". Diese verschiedenen „Familien" der ältesten Huftiere, die notgedrungen zu einer systematischen Einheit vereinigt werden müssen, stellen dagegen eine horizontal abgegrenzte Stammgruppe dar, aus der sich z. B. die Amblypoden, Litopterna, Perissodaktylen und vielleicht auch die Artiodaktylen entwickelt haben. Dieser Gegensatz des systematischen Wertes der einzelnen Ungulatengruppen kann nicht scharf genug betont werden, um falsche Vorstellungen zu vermeiden.

Die meisten Vertreter dieser Protungulaten sind im basalen Eozän der Vereinigten Staaten entdeckt worden (Puerco, Torrejon, Wasatch). Die größten Gegensätze in der Beurteilung der systematischen Stellung betreffen die Frage nach der Stellung der Mioclaenidae, die von Matthew (als †Hyopsodontidae) den Insectivoren eingereiht werden, während sie Schlosser (1911) mit Betonung der Spezialisation der P in die Condylarthra einreiht. Die †Pantolambdidae wurden schon von Cope (1884) mit den †Amblypoda vereinigt; die †Meniscotheriidae wären als Ahnen der †Chalicotheriidae nach demselben Prinzip gleichfalls loszulösen. Am besten ist eine Nebeneinanderstellung der „generalisierten" Protungulaten in eine Einheit, wie dies auch bei den Creodonta von Matthew durchgeführt wurde.

Die gemeinsamen Merkmale der Protungulata bestehen in dem primitiven, creodontenartigen Schädelbau mit langer Sagittalcrista, fast horizontalem Profil, kleinem Gehirn, vollständigem Gebiß mit ursprünglich trituberkulären oberen und trituberkulär-sektorialen unteren M, die im Oberkiefer später vierhöckerig und noch später sechshöckerig werden, in dem einfacheren Bau der P, dem creodontierartigen Bau der I und C, den plantigraden bis semidigitigraden fünfzehigen Gliedmaßen, dem Fehlen der Clavicula, dem Vorhandensein eines Trochanter tertius am Femur, getrennten Unterarm- und Unterschenkelknochen und einer frei endenden Fibula (wie bei Carnivoren); der Fußbau ist fast durchaus creodontierartig; der Gesamthabitus war der kleiner langschwänziger omnivorer Raubtiere, deren Größe zwischen Marder und Tapir schwankte.

† 1. Familie: Mioclaenidae.

Obere M gerundet dreieckig, breiter als lang, ohne zweiten Innenhöcker, sehr insectivorenähnlich; untere M mit vier halbmondförmigen Höckern, die sich in ihrer Form an die Artiodactylen anschließen; P einfach, aber langgestreckt und daher von jenen der Insectivoren verschieden. Skelett unbekannt.

†Mioclaenus im untersten Eozän Nordamerikas. Das Tier erreichte die Größe eines Fuchses (Fig. 43).

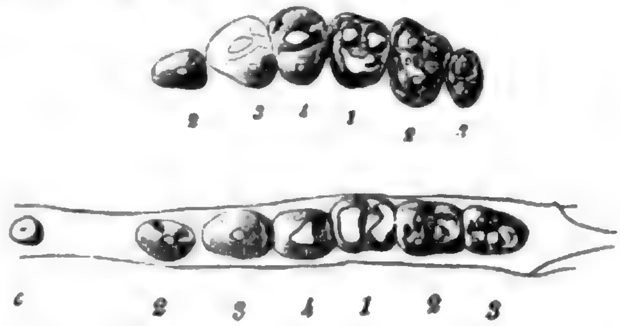


Fig. 43. Oben: obere Backenzähne, unten: untere Backenzähne von †Mioclaenus turgidus aus dem Torrejon. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn und Ch. Earle.



Fig. 44. Obere Backenzähne (obere Reihe) und untere Backenzähne (untere Reihe) von †Conacodon entoconum aus dem Puerco. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn.

†2. Familie: Periptychidae.

Obere M meist dreihöckerig, selten vierhöckerig, P sehr groß, meist einspitzig. Obere Gelenkfläche des Astragalus gegen die Tibia gewölbt und in der Mitte vertieft, wodurch sich diese Formen enge an die †Amblypoden anschließen, ebenso im übrigen Bau des Tarsus. Da jedoch die M bunodont sind, besteht ein Gegensatz zu den †Amblypoden (Schlosser 1911). †Conacodon (Fig. 44) und †Periptychus (von Schafgröße) im Puerco von Neumexiko, †Ectoconus, †Haploconus usf.

†3. Familie: Pantolambdidae.

Schädel raubtierartig, mit hohem Sagittalkamm. I und C raubtierartig. Obere M dreieckig, mit drei Haupthöckern und zwei Nebenhöckern; Haupthöcker V-förmig und somit durchaus ähnlich gebaut wie bei den älteren †Coryphodontidae (†Amblypoda). Untere M mit hohem Trigonid und niedrigem Talonid; P einfacher gebaut. Schwanz lang. Femur mit drittem Trochanter, Astragalus ähnlich wie bei

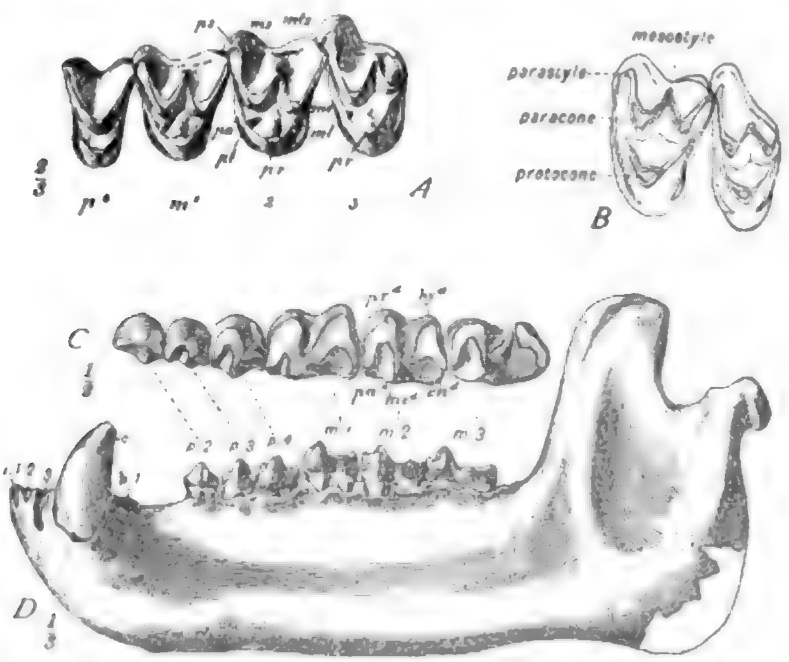


Fig. 45. Pantolambda cavirictus, Torrejonformation. A: obere P^4 M^1 M^2 M^3. $^2/_3$ natürlicher Größe. B: Schema von M^2 M^3. C: untere Backenzähne. ½ natürlicher Größe. D: Unterkiefer. $^1/_3$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

Periptychus. Als die Ahnen der †Coryphodontidae und †Dinoceratidae zu betrachten.

†Pantolambda. Torrejon von Neumexiko.

4. Familie: Phenacodontidae.

Schädel hundeähnlich, Gebiß vollständig. Obere M viereckig, breiter als lang, sechshöckerig (durch Hinzutritt des Hypocons). Untere M gleichfalls sechshöckerig (dreispitziges Trigonid und ebensolches Talonid). Vordere P einfach, P^4 trituberkulär, schon fast wie M^1 gebaut, aber Hypocon noch fehlend. Schwanz lang. Von den †Periptychidae durch längeren Astragalushals und fester gebauten Tarsus verschieden. Spuren einer Opponierbarkeit des Hallux vorhanden, die Zehen gegen die Palmarseite eingebogen.

†Phenacodus (Fig. 47). Größe zwischen Dogge und Tapir schwankend. Wasatch-Beds, Nordamerika.

†Tetraclaenodon (Fig. 48). Torrejon. Gliedmaßen zierlich; M ähnlich denen von Hyracotherium. In dieser Gattung ist eine Form der Phenacodontiden zu erblicken, welche höchstwahrscheinlich den Ausgangspunkt für die Stämme der Equiden, Rhinocerotiden und Titanotheriiden gebildet hat.

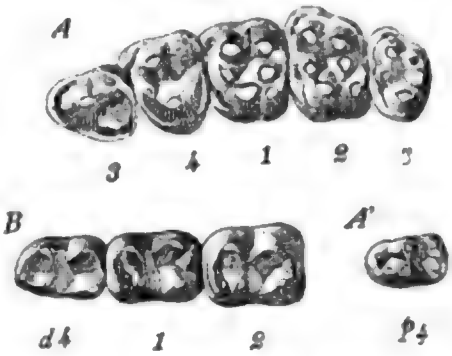


Fig. 48. Obere Backenzähne (obere Reihe) und untere Backenzähne (untere Reihe) von †Tetraclaenodon puercense aus dem Torrejon. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn und Ch. Earle.

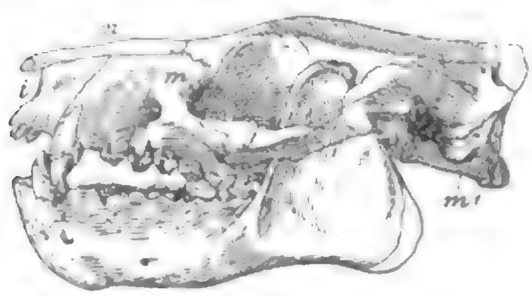


Fig. 46. Schädel von †Pantolambda bathmodon aus dem Torrejon von Neumexiko. $^1/_2$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

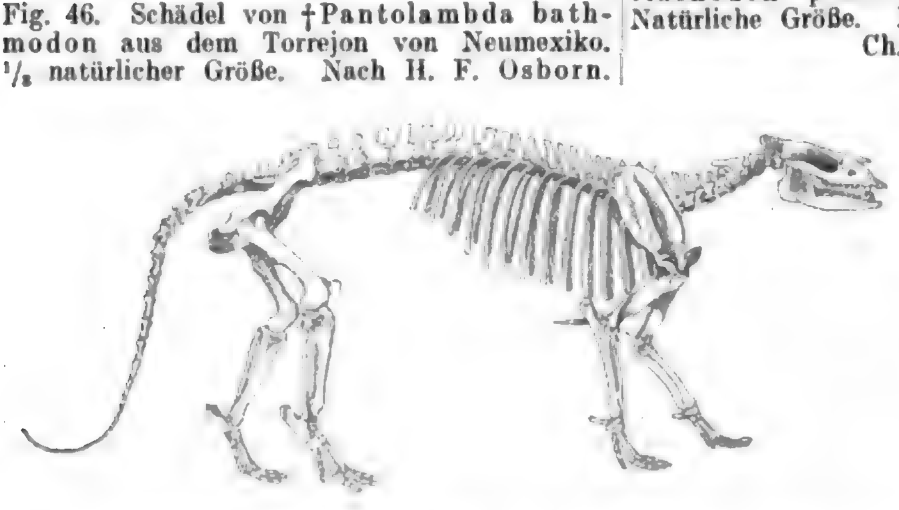


Fig. 47. Rekonstruktion des Skelettes von †Phenacodus primaevus. In $^1/_{10}$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

†5. Familie: Meniscotheriidae.

Zahnreihe lückenlos. Obere M mit W-förmiger Außenwand, unverkennbar den Ausgangspunkt für den Typus der †Chalicotheriiden bildend; hintere P trituberkulär. Untere M und P mit halbmondförmigen Außenmonden wie bei den †Chalicotheriidae. Schwanz lang.

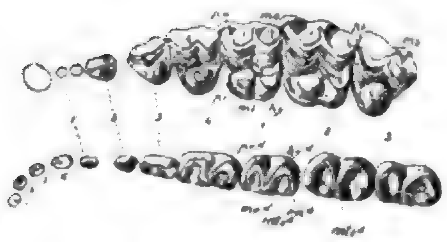


Fig. 49. Obere und untere Backenzähne von Meniscotherium terraerubrae aus dem Wasatch. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn.

†Meniscotherium. Wasatch-Beds, Neumexiko.

† 6. Familie: Pleuraspidotheriidae.

Gebiß vollständig, J, C und P kegelförmig, vor und hinter P_2 ein kurzes Diastem. Obere M quadratisch, fünfhöckerig; der hintere Innenhöcker scheint aus dem Metaconulus hervorgegangen zu sein. Untere M mit vier hohen konischen Höckern, langgestreckt, mit großem, unpaarigen Vorderhöcker. †Pleuraspidotherium aus dem untersten Eozän von Reims scheint in der Phylogenie der Ungulaten eine wichtige Rolle zu spielen, die aber noch nicht genügend aufgeklärt ist.

7. Familie: Bunolitopternidae.

Obere Molaren sechshöckerig, mit Hypocon; mitunter sekundäre Nebenhöcker. Untere M mit zwei V-förmigen Außenhöckern und zwei konischen Innenhöckern, P einfach gebaut. Ganze Familie auf das Eozän Patagoniens beschränkt; die Ahnengruppe der †Litopterna. Zahlreiche unvollständig bekannte Gattungen; am besten bekannt †Didolodus. Mehrere Gattungen (z. B. †Lambdaconus) bilden den Übergang zu den Macraucheniiden, andere (z. B. †Notoprotogonia) zu den Proterotheriiden, andere sind gänzlich erloschen.

X. Ordnung: Artiodactyla (= Paraxonia). „Paarhufer."

In früherer Zeit wurden die „Paarhufer" und „Unpaarhufer" in der Regel als Einheit („Ungulata vera") den übrigen Huftieren gegenübergestellt. Die paläontologischen Forschungen führten jedoch zur Erkenntnis, daß die Artiodaktylen und Perissodaktylen durch eine tiefe Kluft voneinander getrennt sind und daß die Artiodaktylen von Creodontiern abstammen, welche die nächste Verwandtschaft mit der primitiven Gruppe der †Mesonychiden besitzen, während die Perissodaktylen von höher spezialisierten Protungalaten abgezweigt sind.

Die Gegensätze zwischen den beiden genannten Gruppen betreffen zunächst den Gliedmaßenbau. Schon bei den ältesten Perissodaktylen (z. B. †Eohippus) ist der dritte Finger viel länger als die übrigen und der zweite und vierte sind untereinander gleichlang; bei den ältesten Artiodaktylen ist wohl auch der dritte Finger länger als der vierte, aber der zweite und fünfte Finger sind gleichlang. Im Baue des Fußes ist dieser Gegensatz noch schärfer ausgeprägt.

Unter den Creodontiern ist die ausgestorbene Gruppe der †Pseudocreodi mesaxonisch, die Gruppe der †Acreodi und Eucreodi paraxonisch. Die Acreodi haben, wie jetzt nach den Untersuchungen von W. D. Matthew feststeht, keinesfalls den Ausgangspunkt der lebenden Raubtierstämme gebildet; dagegen weisen verschiedene schwerwiegende Gründe darauf hin, daß wir den Ursprung der Artiodaktylen in Creodontiern zu suchen haben, welche den Acreodi nahe stehen, und zwar müssen es Stammformen gewesen sein, welche zwischen den †Mesonychiden unter den Creodontiern und den †Mioclaeniden die Mitte halten. Die Stellung der †Mioclaenidae ist noch unsicher; einige Forscher stellen die Mioclaeniden zu den Insectivoren, andere zu den Condylarthren. Die Unsicherheit in der Beurteilung der systematischen Stellung beruht auf dem primitiven Charakter dieser altertümlichen Typen. Jedenfalls zeigen die Vergleiche des Gliedmaßenbaues von Artiodaktylen und Creodontiern, daß die Artiodaktylen von paraxonischen und nicht von mesaxonischen Vorfahren abstammen müssen. Der Artiodaktylenschädel besitzt zahlreiche Merkmale, die mit dem Schädelbau der älteren Creodontier übereinstimmen, worauf zuletzt W. K. Gregory (1910) hingewiesen hat.

Während die Perissodaktylen dem Aussterben entgegengehen und den Höhepunkt ihrer Entwicklung im Miozän überschritten haben, stehen die Artiodaktylen in der Gegenwart in voller Entfaltung, und zwar sind es insbesondere die selenodonten Typen, welche durch ihren Formenreichtum die übrigen Gruppen überragen.

Das Gebiß der Artiodaktylen umfaßte ursprünglich 44 Zähne $\left(\frac{3.1.4.3}{3.1.4.3}\right)$ und erfuhr im Laufe der Stammesgeschichte insofern eine Reduktion, als sich das Gebiß mehr und mehr der Aufgabe anpaßte, statt der saftigen, gemischten Pflanzennahrung eine hartstengelige, trockene zu zerkleinern. Den Höhepunkt dieser Anpassung haben die Wiederkäuer erreicht; sie sind in der Lage, größere Mengen von Pflanzennahrung abzureißen, nach flüchtigem Kauen zu verschlucken und erst später zu zermahlen, nachdem das Futter im Pansen eine Gärung und Aufweichung erfahren hat. Die schnellfüßigen Wiederkäuer sind durch diese Einrichtungen besser geschützt als jene Ungulaten, welche das Futter an Ort und Stelle zerkauen müssen; sie bedürfen kürzere Zeit zur Nahrungsaufnahme und entgehen somit leichter ihren Feinden als die nicht wiederkäuenden Ungulaten. Daß die Wiederkäuer in so imponierender Zahl über die übrigen Ungulaten der Gegenwart dominieren und daß von den nicht wiederkäuenden Ungulaten fast nur die großen Typen oder nur die schnellfüßigsten (Pferde) übriggeblieben sind, erklärt sich durch die natürliche Selektion der ruminanten Paarhufer.

Bei dieser Art der Nahrungsaufnahme bleiben dem Gebiß zwei Aufgaben übrig: Erstens die Nahrung rasch abzuschneiden oder auszuraufen und zweitens dieselbe zu zermahlen. Daher finden wir, daß die unteren Eckzähne die Form und Funktion der meißelförmigen Schneidezähne erhalten, während die für das Abraufen unwichtigeren oberen Schneidezähne schrittweise verloren gehen.

Die Grasnahrung wird von der Zunge erfaßt und von den unteren Schneide- und Eckzähnen abgeschnitten.

Die Nahrung wird von den Backenzähnen durch horizontale Verschiebung des Unterkiefers und Oberkiefers zerrieben. Hierbei entsteht der selenodonte Molarentypus (vgl. oben). Stets ist der Bau der P einfacher als jener der M; auch dann, wenn die Molaren hypselodont geworden sind, bleiben die P brachyodont. Durch die Verlängerung der Kiefer wird die ursprünglich geschlossene Zahnreihe im vorderen P-Abschnitt auseinandergerissen. Selten bleiben die Eckzähne bei den Artiodaktylen als Waffe erhalten († Dorcatherium (Fig. 63), Hyaemoschus, † Protoceras usf.).

Weitgehende Umformungen haben Hand und Fuß erlitten. Ursprünglich fünfzehig, haben die Gliedmaßen der Artiodaktylen schon frühzeitig den Daumen verloren (ein stummelförmiges Daumenmetacarpale nur bei † Oreodontiden und † Anthracotheriden beobachtet; bei † Oreodon sind auch die Daumenphalangen erhalten).

Ursprünglich waren bei den Artiodaktylen der zweite und fünfte Finger gleichlang, aber der dritte länger als der vierte (vgl. oben). Um die Entstehung der Paraxonie bei den Artiodaktylen zu verstehen, dürfen wir nicht von den extrem spezialisierten lebenden Typen wie Giraffe, Kamel, Hirsch, Schaf ausgehen. Bei diesen Formen ist es durch völlige Verschmelzung der beiden mittleren Metapodien (III und IV) zur Bildung des sogenannten „Kanonenbeins" und damit eigentlich zu einer funktionellen Monodaktylie gekommen, da die Phalangen des III. und IV. Finger- oder Zehenstrahls nur Stützen des funktionell einheitlichen Kanonenbeins darstellen. Ganz anders hat dagegen der ursprüngliche Paarhuferfuß funktioniert. Der primitive Zustand ist unter den lebenden Paarhufern am reinsten bei den Bunodontia erhalten. Bei genauerer Betrachtung sehen wir, daß hier von einer gleichmäßigen Verteilung des Druckes auf die Strahlen III und IV keine Rede sein kann; der Hauptdruck geht ursprünglich auch bei den Artiodaktylen durch die dritte Zehe und die Hand- oder Fußachse schließt mit der Achse des Unterarms oder Unterschenkels einen stumpfen Winkel ein, der nach vorn und außen geöffnet ist. Infolge der ungleichen Länge des III. und IV. Metapodiums laufen beim Schweine die Achsen beider Metapodien nicht parallel, wie es zur Entstehung eines Kanonenbeins nötig wäre, sondern das vierte Metapodium ist mit seinem Unterende ein wenig nach innen verschoben, um die Längendifferenz zwischen dem III. und IV. Strahl auszugleichen. Auf diese Weise wird der fünfte Strahl bei dieser Gruppe von Paarhufern außer Funktion gesetzt und dies führt bei Dicotyles zu einer fast gänzlichen Reduktion im Fuße, während die zweite Zehe noch erhalten blieb. Bei einigen † Anoplotheriden begegnen wir derselben Erscheinung, die Hand von † Anoplotherium war funktionell zweizehig, aber der Fuß funktionell dreizehig (II, III, IV), wobei die zweite Zehe stark nach innen abstand. Bei † Diplobune war nicht nur der Fuß, sondern auch die Hand funktionell dreizehig (Fig. 56), und zwar standen die zweiten Strahlen so stark nach innen ab, daß M. Schlosser das Vorhandensein von Schwimmhäuten annimmt, zumal auch der Schwanz nach seiner Auffassung an das Schwimmen adaptiert war. Jedenfalls ist das Bild der Gliedmaßen von † Diplobune sehr wesentlich von dem Fußtyp der selenodonten Paarhufer verschieden und stellt eine einseitige, extreme Spezialisation des ursprünglichen Gliedmaßenbaues der Artiodaktylenahnen dar. Allgemein gilt für die Artiodaktylen, daß der Fuß in der Spezialisation der Hand vorauseilt und somit die Hand stets das tiefere Evolutionsstadium repräsentiert.

Im Carpus sind dieselben Elemente wie bei den Perissodaktylen vorhanden, und zwar ist die distale Reihe derart verschoben, daß Unciforme und Magnum (C_3) mit je zwei proximalen Carpalia (Ulnare und Intermedium mit Unciforme, Intermedium und Radiale mit dem Magnum) in Verbindung treten. Im Laufe der Stammesgeschichte tritt eine Vereinigung der inneren Carpalia der distalen Reihe ein, das Trapezium (C_1) geht mitunter ganz verloren.

Bei vorgeschrittener Anpassung an schnelles Laufen tritt ebenso wie bei allen schnellfüßigen Ungulaten (z. B. Equus, † Thoatherium) die Entwicklung von Laufkielen an den distalen Gelenkköpfen der Metapodien ein.

Werden die seitlichen Metapodien bei den selenodonten Artiodaktylen rudimentär, so bleiben entweder nur die oberen Enden übrig (plesiometacarpale Rudimente) oder nur die unteren (teleometacarpale Rudimente).

Mitunter sind plesiometacarpale Rudimente vorhanden, aber die distalen Enden der Metapodien verloren gegangen, während die dazugehörigen Phalangen erhalten sind und locker in der Haut stecken („Afterzehen" der Hirsche). Ein Teil der Hirsche ist teleometacarpal (z. B. Reh, Rotspießhirsch, Elch, Ren), ein anderer plesiometacarpal (z. B. Axishirsch, Edelhirsch, Damhirsch).

Im Tarsus treten weitgehende Verschmelzungen ein. Bei den primitiven Formen sind alle Tarsalia getrennt, später verschmelzen Naviculare und Cuboid einerseits, Cuneiforme II und III andererseits und mitunter (z. B. Hyaemoschus, Tragulus) auch alle geannnten Tarsalia zu einem einheitlichen Komplex, so daß nur Cuneiforme I allein frei bleibt. Der Tarsus wird also im Laufe der Phylogenie der selenodonten Paarhufer vereinfacht und die Bewegungsmöglichkeit des Fußes mehr und mehr auf eine einzige Bewegungsebene eingeschränkt — eine Folge der Anpassung an das Laufen. Damit steht die Veränderung der Astragalusgelenke in innigem Zusammenhang. Der Astragalus eines rezenten Artiodaktylen ist von dem eines Unpaarhufers durch seine Form und das Vorhandensein zweier Gelenkrollen (oben und unten) statt nur einer (oben) sofort zu unterscheiden.

† 1. Subordnung: Hypoconifera.

† 1. Familie: Dichobunidae. — In Europa vom ältesten Eozän bis zum Oligozän, in Amerika nur im Obereozän. — Vollständiges Gebiß. — Obere Molaren mit Hypocon. Untere Molaren mit hohem Trigon, niedrigem Talonid. Obere Innenhöcker und untere Außenhöcker der Molaren V-förmig, die übrigen Höcker konisch. Gliedmaßen vierzehig, Lateralzehen dünn.

†Dichobune (= Hyopotamus Rütimeyer non Owen). Obere M mit Mesostyl. Eozän und Oligozän Mitteleuropas.

†2. Familie: Elotheriidae. — In Nordamerika vom Obereozän bis zum Miozän, in Europa nur im Oligozän. — Obere Molaren mit Hypocon, der aus dem Basalband hervorging. Untere Molaren mit höherer Vorderhälfte. Gliedmaßen vierzehig oder zweizehig.

†Elotherium (= Entelodon Aym., Archaeotherium Leidy). — Unterkiefer mit starken Muskelansätzen, Jugale wie bei den Xenarthra mit nach unten weit vorspringendem Fortsatz; Schädelkapsel sehr schmal, Jochbögen weit ausladend. — Oligozän Frankreichs, Oligozän und Untermiozän Nordamerikas.

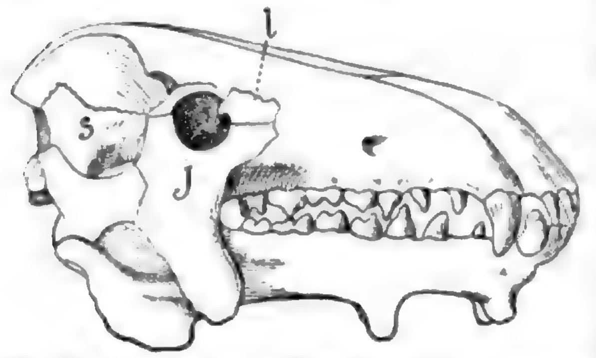


Fig. 50. Schädel von †Elotherium crassum (von der Seite und von oben) aus den White-River-Beds in Dakota. 1/8 natürlicher Größe. Nach O. C. Marsh.

†2. Subordnung: Caenotheriidae.

†1. Familie: Caenotheriidae. — Nur vom Obereozän bis Untermiozän in Europa. — Zahnreihe vollständig, fast geschlossen, nur im Prämolarenabschnitt mit größeren Zwischenräumen. — Protocon in die Hinterhälfte der Krone verschoben. Gliedmaßen vierzehig, Seitenzehe kürzer und schwächer als die mittleren, Cuboid und Naviculare getrennt.



Fig. 51. Schädel von †Caenotherium Filholi aus den Phosphoriten des Quercy. 2/3 natürlicher Größe. Aus dem „Guide to the Fossil Mammals and Birds" Brit. Mus. Nat. Hist. London.

†Caenotherium. Unterkiefer massiv, plump gebaut. Oligozän bis Untermiozän. Die kleinen Tiere hatten Größe und Habitus der Zwergmoschushirsche. Am häufigsten in den Phosphoriten des Quercy, seltener im Miozän Deutschlands.

3. Subordnung: Euartiodactyla.

1. Superfamilie: Neobunodontia.

1. Familie: Suidae (Schweine).

Gebiß ursprünglich lückenlos, später Reduktion des I 3 und $\frac{P\,4}{P\,4}$, brachyodont, bunodont; ursprünglich oligobunodont (†Palaeochoerus), zuletzt polybunodont (Sus). P einfacher als M, Eckzahn kräftig, aber erst bei den jüngeren Formen als Waffe entwickelt, während bei den älteren (z. B. †Sus erymanthius) aus dem Unterpliozän gewaltige Knochenprotuberanzen über den C die Waffen ersetzen. Hand immer vierzehig, Fuß mitunter dreizehig. Die ältesten Suiden treten im Mitteleozän Europas auf, in Nordamerika erscheinen sie erst im White River (Oligozän). Hauptentfaltung der Familie vom Beginn der Miozänzeit an.

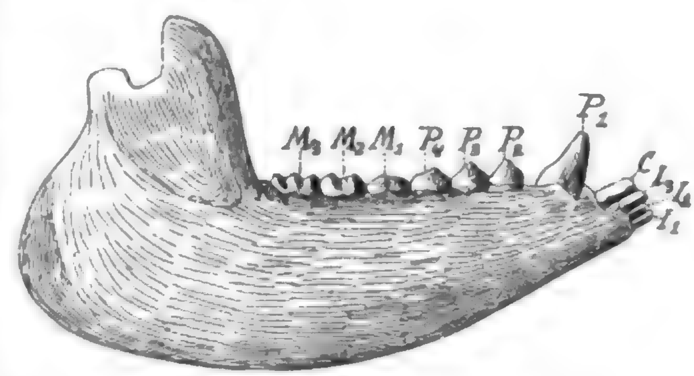


Fig. 52. Unterkiefer von †Cebochoerus minor aus den Phosphoriten des Quercy. 2/3 natürlicher Größe. Nach H. G. Stehlin.

†Cebochoerus. Mitteleozän bis Obereozän Mitteleuropas. Oberer C dolchförmig, vertikal, obere M viereckig, in der vorderen Reihe 3, in der hinteren 2 Höcker; Unterkiefer im hinteren Abschnitt sehr hoch. Im Unterkiefer ist wie bei den Wiederkäuern der Eckzahn als Schneidezahn entwickelt und die Rolle des C wird vom $P_{\overline{1}}$ übernommen. Daher kann Cebochoerus nicht der Ahne der jüngeren Suiden sein, ebenso auch nicht †Choeropotamus, mit gleicher Differenzierung des Vordergebisses, aus dem Obereozän von Frankreich und England.

Der Uebergang zu den jüngeren Suiden scheint sich jedoch außerhalb Europas vollzogen zu haben; †Choeromorus (Obereozän Europas) ist selbst kaum der Stammvater der jüngeren Suiden, doch müssen dieselben von Formen mit choeromorusartigem Gebiß abstammen. †Propalaeochoerus, der Stammvater des miozänen †Palaeochoerus, ist im Oligozän in Europa eingewandert. Im Miozän erscheint †Hyotherium, das im Unterpliozän Indiens erlischt.

†Listriodon aus dem Miozän Europas und Unterpliozän Indiens ist ein Suide mit mächtigen, dreikantigen, gebogenen unteren Hauern; die oberen Eckzähne sind kurz, dick und nach oben gebogen. Die ersten Arten von Sus erscheinen im Unterpliozän Europas und Indiens und be-

sitzen noch keine zu großen Hauern entwickelten Eckzähne.

2. Familie: Hippopotamidae.

Die Herkunft der Hippopotamiden ist noch nicht aufgeklärt. Die Spezialisation des Vordergebisses spricht jedoch gegen eine Ableitung von cebochoerusartigen eozänen Suiden, obwohl dies Stehlin (1899, 1900, 1908) vertritt. Jedenfalls sind sie aus Suiden hervorgegangen. Da aber die ältesten Hippotamiden erst aus dem Unterpliozän Indiens bekannt sind, so sind wir über die Geschichte dieser Familie noch im unklaren.

†Hexaprotodon ist eine erloschene Untergattung mit 3 Schneidezähnen jederseits, während die aus ihr hervorgegangene lebende Untergattung Tetraprotodon (T. amphibium) nur noch 2 besitzt. In der Eiszeit war das Flußpferd in Europa bis nach England verbreitet. Zwergformen sind aus dem Plistozän von Sizilien, Malta, Cypern, Kreta und Madagaskar bekannt; eine lebende Zwergform findet sich in Liberia.

† 2. Superfamilie: Bunoselenodontia.

†1. Familie: Anthracotheriidae.

Gebiß lückenlos, meist mit großen Schneidezähnen und Eckzähnen. Obere M mit 4 Haupthöckern und einem Protoconulus, untere M vierhöckerig. Die 3 vorderen P einspitzig. Carpalia, Tarsalia und Metapodien unverwachsen, Gliedmaßen vierzehig. Die ältesten Anthracotherien erscheinen im Mitteleozän Europas; die Hauptentfaltung fällt in das Oligozän Europas, wo sie im Aquitanien sehr häufig sind. Sie erlöschen im Miozän (Bugti Hills) in Ostindien. Aus Amerika sind nur wenige oligozäne Arten bekannt.

Guy E. Pilgrim unterscheidet (1912) drei Stämme unter den Anthracotheriiden nach den Charakteren der Molarstruktur:

1. Protoconulus der oberen M gut entwickelt und vom Protocon getrennt (†Anthracotherium, †Microselenodon, †Brachyodus, †Ancodus).
2. Protoconulus groß, teilweise mit dem Protocon vereinigt (†Merycops, †Hyoboops).
3. Protoconulus sehr klein oder fehlend (†Telmatodon, †Gonotelma, †Choeromeryx, †Hemimeryx, †Merycopotamus).

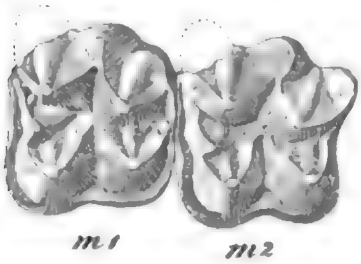


Fig. 53. Die beiden ersten oberen linken Molaren ($\underline{M1}$, $\underline{M2}$) von †Anthracotherium aus dem Oberoligozän (Protoceras Beds) Nordamerikas. ²/₃ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

†Anthracotherium ist im Oligozän Europas sehr häufig, in Amerika (White River) selten (Fig. 53). Die jüngsten Arten (†A. bugtiense) im Miozän Ostindiens, wo auch †Merycopotamus, †Microselenodon, †Brachyodus, †Merycops, †Hyoboops, †Ancodus, †Gonotelma, †Telmatodon und †Hemimeryx auftreten, die zum Teil durch bedeutende Körpergröße auffallen. Die größten †A.-Arten erreichten Nashorngröße, die kleineren kaum die eines Schweines. Die oberen M sind breiter als lang und besitzen 4 V-förmige oder kegelförmige Höcker. Das primitivste der europäischen Anthracotherien ist †A. (Prominatherium) dalmatinum aus dem untersten Oligozän des Monte Promina in Dalmatien.

†Brachyodus, mit †Anthracotherium nahe verwandt, ist im Oberoligozän Europas, ferner im Miozän von Mitteleuropa, Aegypten und Ostindien gefunden worden. Im Oligozän von Ronzon (Haute Loire) ist die Gattung †Ancodus häufig, die auch im Oligozän Aegyptens und Nordamerikas auftritt. Der Schädel ist lang und schmal, C sehr schwach, durch große Lücke vom P_1 getrennt.

†Rhaghatherium aus den eozänen Bohnerzen Süddeutschlands und der Schweiz wird zu den †Anthracotheriiden gestellt, ohne daß bis jetzt seine verwandtschaftlichen Beziehungen zu den jüngeren Gattungen aufgeklärt worden wären.

† 2. Familie: Anoplotheriidae.

Zahnreihe lückenlos, geschlossen; $\underline{I1}$ mitunter vergrößert und vom I^2 getrennt. Der C in Form und Größe nicht scharf von den angrenzenden Zähnen unterschieden. Von den 5 Höckern der oberen M mit Ausnahme des konischen Protocons alle V-förmig. Gliedmaßen von jenen der übrigen Artiodaktylen sehr verschieden gebaut. Schwanz sehr lang. Nur aus dem Eozän und Oligozän Europas bekannt.

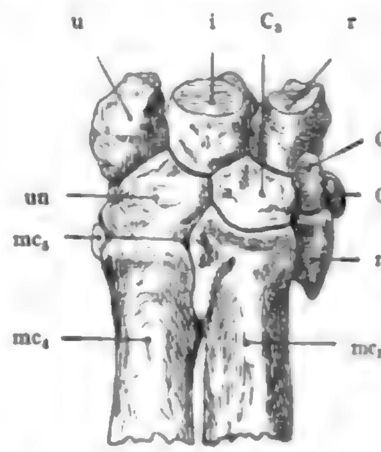


Fig. 54. Handwurzel von †Anoplotherium. Nach W. Kowalevsky.

†Anoplotherium, zuerst von Cuvier aus den Gipsen des Montmartre beschrieben und rekonstruiert, war ein kurzbeiniges, langschwänziges Tier von Tapirgröße, dessen Schwanz wahrscheinlich als Schwimmorgan diente; die drei gespreizten Zehen des Hinterfußes (II, III, IV, die I. rudimentär, die V. ganz fehlend) waren nach Meinung Schlossers durch eine Schwimmhaut verbunden. Die Hand war zweizehig (III. und IV. Finger, die beiden anschließenden, II. und V., zu knotenförmigen Rudimenten reduziert).

†Diplobune besaß dreifingerige Hand und dreifingerigen Fuß, beide nach dem Typus des Hinterfußes von †Anoplotherium gebaut. Nur im Oligozän Mitteleuropas.

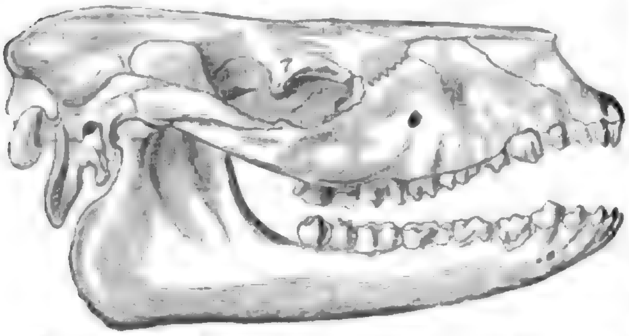


Fig. 55. Schädel von †Anoplotherium commune aus den obereozänen Gipsen des Montmartre in Paris. $^1/_8$ natürlicher Größe. Nach H. M. D. de Blainville.

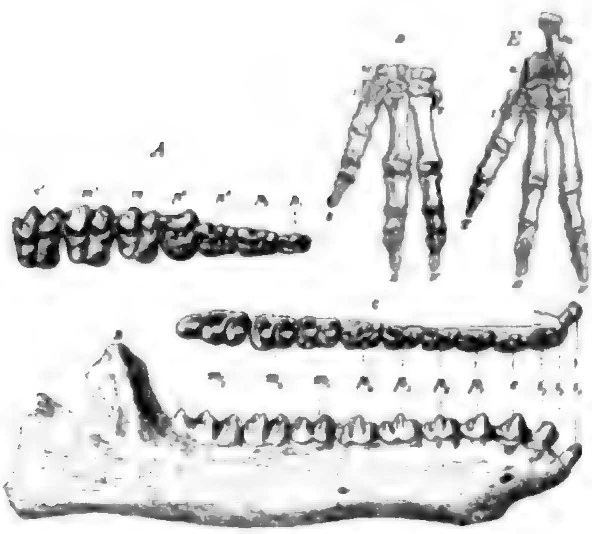


Fig. 56. †Diplobune Quercyi aus den Bohnerzen von Eselsberg bei Ulm. A: obere Backenzähne, B und C: Unterkiefer und Unterkieferzähne, D: Hand, E: Fuß. A, B, C, in $^1/_3$, D und E in $^1/_8$ natürlicher Größe.
Nach K. A. von Zittel und M. Schlosser.

†Mixtotherium aus den eozänen Phosphoriten und den Schweizer Bohnerzen fällt durch den brüllaffenähnlichen, sehr hohen Unterkiefer auf. Die Jochbogen springen weit nach den Seiten vor.

3. Superfamilie: Selenodontia.

†1. Familie: Oreodontidae.

Gebiß mit wenigen Ausnahmen (†Agriochoerus, †Leptauchenia) vollständig, meist geschlossen, selten mit Lücken im Eckzahnabschnitt (z. B. †Promerycochoerus). Unterer P_1 als Eckzahn funktionierend, da dieser in die Schneidezahngruppe einbezogen ist. Unterarmknochen getrennt. Carpalia, Tarsalia, Metapodien frei. Gliedmaßen vierzehig, mitunter ein Daumenrudiment vorhanden. Nur im Obereozän bis Miozän Nordamerikas.

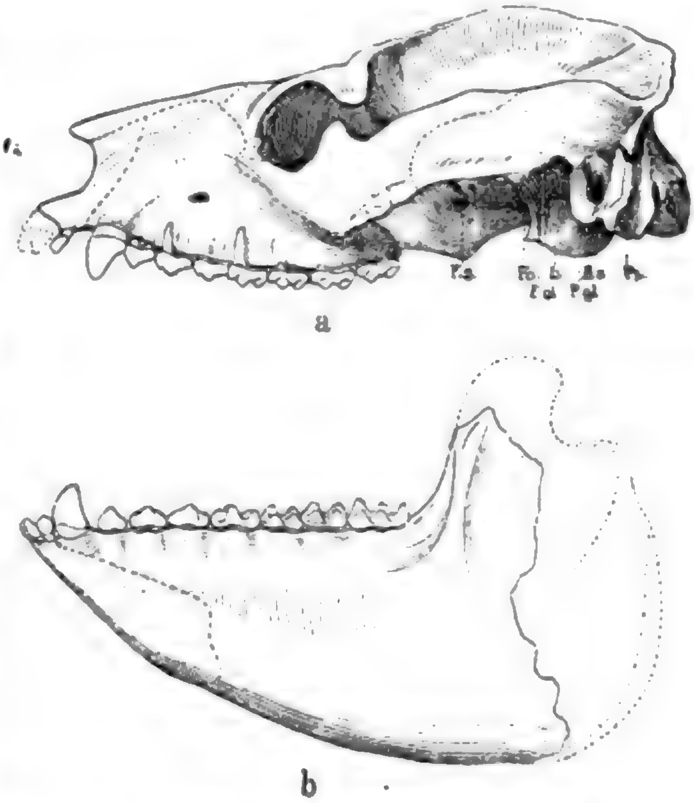


Fig. 57. a Schädel und b Unterkiefer zweier verschiedener Individuen von †Mixtotherium cuspidatum aus den Phosphoriten des Quercy. ½ natürlicher Größe. Nach H. G. Stehlin.

†1. Unterfamilie: Agriochoerinae.

Der Habitus erinnert wie bei den †Anoplotheriden an primitive Carnivoren. Der Gliedmaßenbau ist jedoch im Gegensatz zu den †Anoplotheriden rein artiodaktyl. Die Orbita ist hinten offen, der Schwanz lang, der Humerus besitzt eine niedrige Trochlea, die

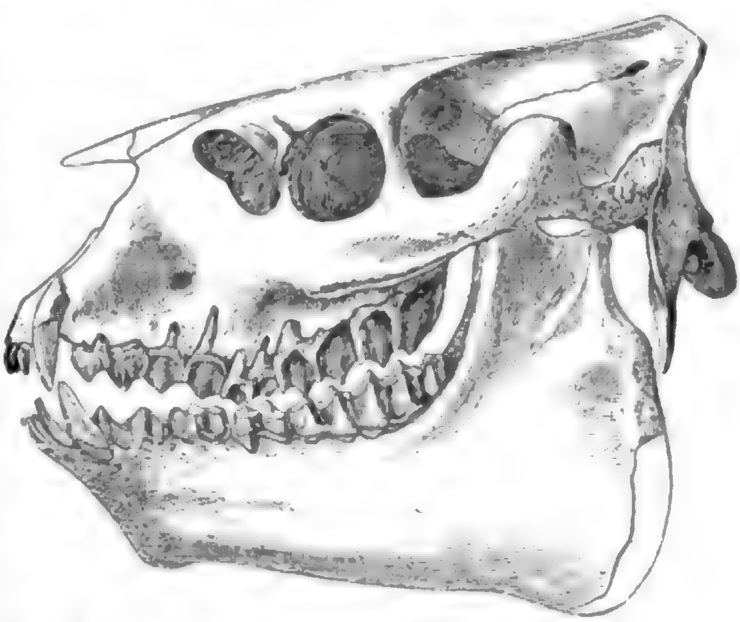


Fig. 58. Schädel von †Ticholeptus breviceps aus dem Mittelmiozän Nordamerikas. $^3/_8$ natürlicher Größe. Nach Carl Douglass.

Zehen enden in Krallen. Nur im Obereozän und Oligozän Nordamerikas. †Protagriochoerus, †Agriochoerus.

†2. Unterfamilie: Oreodontinae.

Der Habitus erinnert an Schweine. Auffallend ist die Ausbildung des Vordergebisses und die starke Ausladung der Jochbögen, die nach Schlosser an Flußpferde erinnert. Die Orbita ist nur sehr selten offen, sonst hinten geschlossen, der Schwanz kurz, der Humerus besitzt eine hohe Trochlea, die Zehen enden in Hufe. †Oreodon im Oligozän, †Promerychoerus im Untermiozän, †Ticholeptus im Mittel- und Obermiozän Nordamerikas.

†2. Familie: Xiphodontidae.

Primitive Paarhufer aus dem Obereozän und Unteroligozän Europas, die durch ihren elegant gebauten Körper an den Habitus der Hirsche erinnern. Gebiß vollständig, Molaren selenodont. Vordere P sehr langgestreckt. Unterer P_1 als Eckzahn funktionierend oder in der Größe von den angrenzenden Zähnen nicht verschieden. Seitenzehen rudimentär, Gliedmaßen funktionell zweizehig.

†Xiphodon wurde ursprünglich von Cuvier (1822) für eine Untergattung von †Anoplotherium gehalten. †Xiphodon gracile ist in früherer Zeit, da die Gipsgruben auf dem Montmartre noch im Betriebe waren, häufiger gefunden worden; seit Cuvier ist nur wenig Wesentliches über dieses kleine Tier bekannt geworden. Mit †Xiphodon scheint †Tapirulus verwandt zu sein. Weitere Xiphodontidengattungen sind †Pseudamphimeryx, †Amphimeryx, †Haplomeryx, †Dichodon usw.

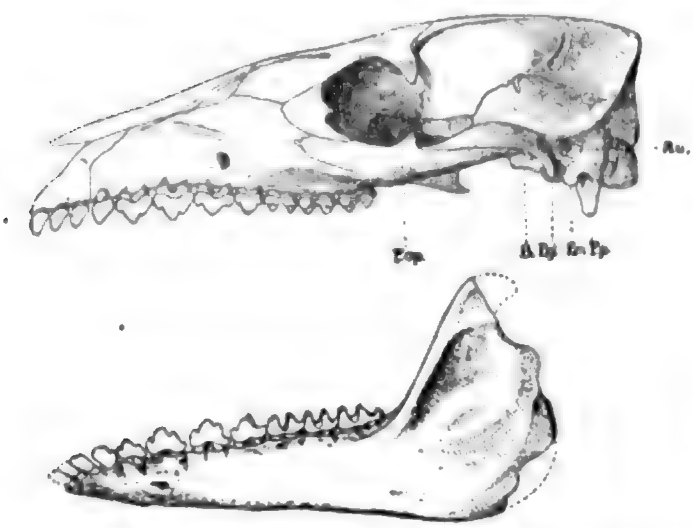


Fig. 59. Schädel und Unterkiefer von †Tapirulus hyracinus. — Oberes Eozän (Ludien) von Lamandine (Quercy), Frankreich. — $^1/_3$ natürlicher Größe. Nach H. G. Stehlin.

3. Familie: Camelidae (Kamele).

Gebiß bei den älteren Gattungen vollständig, bei den jüngeren reduziert, und zwar betrifft die Reduktion die oberen Schneidezähne (I^1, I^2) und den zweiten Prämolaren (eine ungewöhnliche Form der Prämolarenreduktion). Bei keiner Form sind an den unteren Gelenkenden der Metapodien Laufkiele zur Ausbildung gelangt.

Die Cameliden sind in Nordamerika entstanden, wo sie vom Obereozän bis zum Plistozän lebten. Im Pliozän wanderten sie von hier nach Asien und später nach Nordafrika ein. Nach Südamerika gelangten sie aus Nordamerika nach Herstellung der Landbrücke in der oberen Miozänzeit. Nur zwei Gattungen (Camelus in Eurasien, Auchenia in Südamerika) haben sich erhalten.

Die ältesten Cameliden sind im Obereozän (Uinta-Beds) entdeckt worden. Unter diesen ist †Protylopus am besten bekannt (Fig. 60). Das

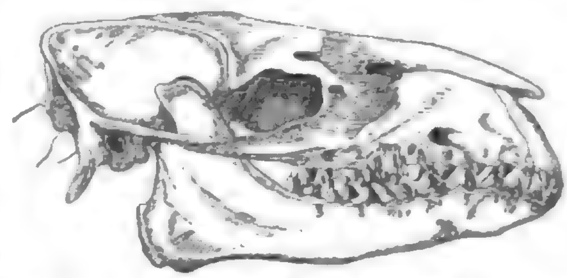


Fig. 60. Schädel von †Protylopus Petersoni aus dem Obereozän (Uinta) von Nordamerika. Nach W. B. Scott.

Tier war von Hasengröße und besaß ein vollständiges Gebiß in geschlossener Reihe. Durch die Schmalheit der Schnauze erinnert †Protylopus an das Lama, aber Radius und Ulna sind frei und verschmelzen erst bei höherem Alter in der Mitte; die Metapodien sind nicht verwachsen, die Hand vierfingerig, der Fuß zweizehig (Seitenzehen noch als Griffelbeine erhalten); die Fibula ist sehr stark verkümmert. Diesem primitiven Cameliden reiht sich das oligozäne †Poëbrotherium aus dem White River an (Fig. 61). Das Tier ist bereits be-



Fig. 61. †Poëbrotherium Wilsoni aus den White-River-Beds von Nebraska. Schädel, $^2/_5$ natürlicher Größe. Nach J. L. Wortman.

deutend größer (ungefähr wie ein Reh); die Spezialisation des Gebisses ist vorgeschritten, da in der Region der Eckzähne ein Auseinanderrücken der Zähne beginnt und die Molaren hochkronig geworden sind; die Seitenfinger und Seitenzehen sind hochgradig rudimentär; Ulna und Radius sind verwachsen.

Bei †Protomeryx aus dem Untermiozän (Arikareeformation, Merycochoeruszone) sind die Eckzähne geschärft und gekrümmt, die Orbita schließt sich am Hinterrande fast ganz, die Gliedmaßen werden digitigrad und daher die End-

phalangen reduziert. Diese Veränderungen steigern sich bei †Protolabis aus dem Obermiozän (Procameluszone) immer mehr; hier sind die Molaren ausgesprochen hypsodont; $P^{\underline{2}}$ ist im Schwunde begriffen; aber die Metapodien sind noch immer nicht zu einem Kanonenbein verschmolzen. Etwas weiter entwickelt ist der jüngere †Procamelus, bei dem bereits die oberen I^1 und $I^{\underline{2}}$ verloren gegangen sind, ebenso wie der obere und untere P^2; die Metapodien sind zu Kanonenbeinen verschmolzen. In dieser Zeit scheint die Abzweigung des Lamastammes erfolgt zu sein, während sich in Nordamerika die echten Kamele von †Protolabis abzweigten und über †Pliauchenia (der untere $P_{\overline{2}}$ fehlt hier bereits gänzlich) zu Camelus entwickelten, dessen Gebiß durch das Fehlen der oberen I^1 und I^2 sowie des unteren und oberen P^2 gekennzeichnet ist. Ein Kamel aus dem Unterpliozän Ostindiens, der erste Einwanderer nach Eurasien, gehört einem von Camelus verschiedenen, ausgestorbenen Stamme an, während die echten Kamele erst viel später von Nordamerika einwanderten.

4. Familie: Tragulidae (Zwerghirsche

Kein Geweih. Gebiß reduziert (alle oberen I fehlen ausnahmslos, bei spezialisierten Typen $P^{\underline{1}}$ und P_1). Oberer Canin säbelartig, unterer in die Schneidezahngruppe einbezogen; die Prämolaren besitzen schneidende Kronen. Ulna stets frei, im Carpus und Tarsus Verschmelzungen. Metapodien III und IV entweder getrennt oder bei spezialisierten Typen zu einem Kanonenbein verschmolzen, seitliche Metapodien (II und V) als Griffelbeine entwickelt, bei den †Gelocinae in einen getrennten proximalen und distalen Abschnitt zerlegt. Die größten Traguliden erreichten die Größe eines Rehs; die ersten erscheinen im Oligozän Europas und die ganze Familie ist nie nach Amerika ausgewandert. Unter den zwei Unterfamilien der †Gelocinae und Tragulinae (mit den lebenden Gattungen Tragulus in Ostindien und den Sundainseln und Hyaemoschus in Westafrika) erlischt die erstere mit †Gelocus (Fig. 62) schon im Oligozän. †Dorcatherium (Fig. 63) ist der letzte Vertreter der Traguliden in Europa, wo es im Unterpliozän (Pikermifauna von Eppelsheim bei Mainz) ausstirbt.

†5. Familie: Hypertragulidae.

Bei den ältesten Gattungen ist der Schädel hornlos und geweihlos, später tritt ein von Haut überzogenes Geweih auf (bei †Blastomeryx gemmifer aus Nordamerika). Die oberen I fehlen gänzlich, unterer Eckzahn in die Schneidezahngruppe miteinbezogen. Metacarpalia mit Ausnahme von †Blastomeryx gemmifer frei, Metatarsalia III und IV stets verwachsen, ebenso das Cuboid mit dem Naviculare. — Die †Hypertraguliden sind niemals über die Grenzen Nordamerikas ausgewandert und lebten hier vom Oligozän bis zum Miozän. Aus dem oligozänen †Leptomeryx ist der miozäne †Blastomeryx hervorgegangen, dessen höchst spezialisierte Art †Blastomeryx gemmifer (Fig. 64) repräsentiert, bei welchem ein kurzes Gablergeweih entwickelt ist. Dieser Stamm führt nach W. D. Matthew (1908) zur lebenden Gattung Mazama.



Fig. 62. Hinterfuß von †Gelocus communis aus dem Oligozän von - Ronzon, Frankreich. ½ natürlicher Größe. Nach W. Kowalevsky.



A B

Fig. 64. †Blastomeryx gemmifer aus dem Unterpliozän (Loup-Fork) von Nebraska. A Hand, B Fuß. Beide in ²/₃ natürlicher Größe. Nach W. B. Scott.



Fig. 63. Dorcatherium Naui aus dem Unterpliozän von Eppelsheim. ¹/₃ natürlicher Größe. Nach J. J. Kaup.

6. Familie: Cervidae (Hirsche).

Die ältesten Cerviden aus dem Untermiozän besaßen noch keine Geweihe; später bildet sich ein „Spießergeweih", dann im Mittelmiozän ein „Gablergeweih" und schließlich im Pliozän ein „Sechsergeweih" mit drei Sprossen aus; erst

spät, im Oberpliozän und Plistozän, entfaltet sich das Geweih einzelner Formen zu außerordentlich reicher Verzweigung und erreicht beim Riesenhirsch gewaltige Dimensionen. Die Phylogenie des Geweihs kommt bei den lebenden Hirschen (z. B. Reh und Edelhirsch) insoweit zur Wiederholung, als im ersten Jahre ein „Spießergeweih", dann ein „Gablergeweih", dann ein „Sechsergeweih" sich entwickelt, das in jedem Winter abgeworfen und durch ein rasch wachsendes neues ersetzt wird; beim Edelhirsch steigt die Zahl der Sprossen noch weiter und erreicht durch Zerteilung der obersten Sprossen in seltenen Fällen eine ganz enorme Zahl (der vom Kurfürst Friedrich III. im Jahre 1696 bei Fürstenwalde geschossene 66-Ender). Bekannt ist das „Zurücksetzen" der Endenzahl bei zunehmendem Alter des Tieres. Mit Ausnahme des Rens ist nur das Männchen geweihtragend.

Das Gebiß ist stark reduziert; die oberen I fehlen stets, der obere Eckzahn ist häufig nur bei den Männchen vorhanden, der untere Eckzahn in die Schneidezahngruppe miteinbezogen. Der Kronenschmelz ist stark gerunzelt; an der Innenseite der oberen M und an der Außenseite der unteren M ist ein Basalpfeiler ausgebildet. Der obere und untere P 1 fehlt bei den jüngeren Cervidengattungen.

Im Metapodium sind die Seitenzehen rudimentär, und zwar sind entweder nur proximale Rudimente (plesiometacarpale) oder nur distale (teleometacarpale) erhalten. Die erstere Erscheinung ist insbesondere bei den eurasiatischen, die zweite bei den amerikanischen Hirschen zu beobachten. In Afrika haben die Hirsche stets gefehlt.

1. Unterfamilie: Moschinae (Moschushirsche).

Fossil aus dem Unterpliozän Ostindiens bekannt; die Reste gehören der lebenden Gattung Moschus an.

2. Unterfamilie: Cervulinae (Muntjakhirsche)

In Europa sind einzelne fossile Gattungen aus dem Miozän bekannt, doch sind sie hier bereits im Unterpliozän erloschen und leben heute nur noch in Südasien (Cervulus). Geweihlose Gattungen waren †Amphitragulus und †Palaeomeryx; einzelne Palaeomeryxarten erreichten die Größe eines Edelhirsches (†Palaeomeryx eminens). Die oberen Eckzähne von †Palaeomeryx waren größer, als dies sonst bei allen Muntjakhirschen der Fall ist. †Dicroceros hatte ein zwei-, selten dreisprossiges Geweih, das wahrscheinlich nicht abgeworfen wurde. Der Rosenstock liegt hoch über dem Schädeldach. †Cervavus aus dem Unterpliozän Chinas dürfte der Stammvater der modernen Rehe und echten Hirsche, der Gattung Elaphus sein.

3. Unterfamilie: Cervinae (echte Hirsche).

Die echten Hirsche leben auf der nördlichen Hemisphäre und in Südamerika, fehlen aber in Afrika. Im Unterpliozän Europas treten die ersten Vertreter der Gattung Capreolus auf. Elaphus erscheint erst im oberen Pliozän. Mit dem Damhirsch verwandt ist der Riesenhirsch der Eiszeit, der in Mitteleuropa erst in historischer Zeit ausstarb. Der ältere Riesenhirsch wird als †Megaceros euryceros vom irischen Riesenhirsch †Megaceros hibernicus unterschieden. Im unteren Plistozän Europas lebte ein gewaltiger Elch, †Alces latifrons.

† 4. Unterfamilie: Protoceratinae.

Ein auf Nordamerika beschränkter Stamm der Hirsche, der zuerst im Obereozän erscheint und im oberen Oligozän erlischt. Zu den auffallendsten Merkmalen gehörten die jedenfalls mit Haut überzogen gewesenen plumpen und niedrigen Schädelzapfen, die nur den ältesten Gattungen wie †Camelomeryx aus dem Obereozän fehlen, aber bei †Protoceras und namentlich †Syndyoceras als mächtige Zapfen ausgebildet sind (bei den Weibchen kleiner).



Fig. 65. †Syndyoceras, ein Protoceratide aus dem Daemonhelix-Beds von Sioux-County, Nebraska. Nach E. H. Barbour.

7. Familie: Giraffidae (Giraffen).

Die Giraffiden oder Camelopardaliden umfassen zwei getrennte Stämme: die Unterfamilien der Giraffinae und die †Sivatheriinae. Nach den Untersuchungen Max Schlossers ist es wahrscheinlich, daß der Stamm der Giraffinae auf große †Palaeomeryxarten des europäischen Miozäns zurückgeht, während die †Sivatheriinae von nordamerikanischen †Protoceratinae abzuleiten sind.

1. Unterfamilie: Giraffinae.

Die Gliedmaßen zeigen durch gänzlichen Schwund der seitlichen Metapodien und Afterzehen eine hohe Spezialisationsstufe; die Eckzähne des Oberkiefers fehlen bei allen Gattungen. Der Schädel der hochbeinigen Tiere ist entweder hornlos oder trägt Knochenzapfen auf den Frontalia. Die ältesten Giraffinen erscheinen im Unterpliozän Europas wie das hornlose

†Helladotherium und die gehörnten Gattungen †Palaeotragus und †Samotherium in der Pikermifauna; zur selben Zeit treten bereits echte Giraffen (Camelopardalis) auf. Die Giraffinen sind eine auf Eurasien und Afrika beschränkte Gruppe, die heute nur noch in Afrika lebt (Camelopardalis und Okapia).



Fig. 66. Schädel und Unterkiefer von †Samotherium Boissieri aus dem Unterpliozän von Samos. Stark verkleinert. Nach J. C. Forsyth-Major.

2. Unterfamilie: Sivatheriinae.

Diese Gruppe umfaßt mehrere große Formen aus dem Pliozän von China, Ostindien und Osteuropa (Adrianopel). Der Schädel trug mächtige Knochenzapfen an der Grenze der Frontalia und Parietalia, deren Form von allen bekannten Schädelzapfenformen abweicht. Am besten bekannt ist †Sivatherium giganteum aus den Siwalik Hills und von Adrianopel.



Fig. 67. Schädel von †Sivatherium giganteum aus dem Pliozän der Siwalikberge, Ostindien. Stark verkleinert. Nach O. Abel.

8. Familie: Antilocapridae.

Diese kleine Familie, in der Gegenwart nur durch Antilocapra vertreten, tritt zuerst mit der Gattung †Hypisodus im Oligozän (White River) Nordamerikas auf und hat Nordamerika niemals verlassen. †Hypisodus hatte die Größe eines Kaninchens, der Schädel war hornlos. Die systematische Stellung der Antilocapriden wird verschieden beurteilt; manche stellen sie als Unterfamilie zu den Boviden. Die verwandtschaftlichen Beziehungen zu den Cerviden, welche einige Autoren auf Grund der ähnlichen



Fig. 68. †Hypisodus minimus aus dem Oligozän (White River Beds) von Colorado. $^3/_4$ natürlicher Größe. Nach E. D. Cope.

Geweihbildung annahmen, scheinen nicht zu bestehen. Bei †Hypisodus sind in den Schneidezahnabschnitt des Unterkiefers außer den drei Inzisiven der Eckzahn und der vorderste P mit einbezogen. †Merycodus besaß ein hohes, hirschähnlich verzweigtes Geweih mit Rosenstock (Mittelmiozän bis Pliozän Nordamerikas).

9. Familie: Cavicornia.

Bei allen Cavicorniern fehlen die oberen Schneidezähne und Eckzähne sowie die oberen und unteren P 1, mitunter auch der obere und untere P 2. Der untere Eckzahn funktioniert wie ein Schneidezahn. Bei den älteren Gattungen sind die Molaren noch brachyodont, bei den spezialisierten hypselodont bis prismatisch (Bovinae). Bei den unteren Molaren gleicht die Außenhälfte der Krone der Innenhälfte der oberen Molaren und umgekehrt. In den Gliedmaßen sind die Seitenzehen stärker reduziert als bei den Cervicornia; die mittleren Metapodien vereinigen sich frühzeitig zu einem Kanonenbein. Gegenwärtig stehen die Cavicornia als einziger Stamm der einst so außerordentlich formenreichen Gruppe der Huftiere in ihrer Blütezeit, und zwar insbesondere in Afrika, wohin sie aber relativ spät eingewandert sind. Die Unterfamilie der Aegodontia hat das hypselodonte Molarenstadium früher als die Boodontia erreicht. Wir können die Cavicornier bis in das Miozän Europas zurückverfolgen; wahrscheinlich sind sie aus den Cervicornia entstanden. Zu den wesentlichsten Schädelmerkmalen gehört die Knickung der faciokranialen Schädelachse, so daß die unpaaren Knochen der Schädelbasis mit der Achse des Gesichtsschädels einen stumpfen Winkel einschließen. Die großen Stirnbeine sind von Luftzellen erfüllt; über den Augenhöhlen sind Schädelzapfen zur Entwicklung gelangt, welche im Inneren meist hohl, selten massiv sind. Die Hohlräume der Schädelzapfen stehen mit den Luftzellen der Stirnbeine in Verbindung.

1. Unterfamilie: Aegodontia.

1. Gruppe: Neotraginae (lebend in Afrika).
2. Gruppe: Gazellinae. Die echten Gazellen erscheinen zuerst im Unterpliozän Eurasiens, in

der Gegenwart leben sie in Asien und Nordafrika.

3. Gruppe: Rupicaprinae. Die Gemsen erscheinen zuerst in der Eiszeit Mitteleuropas.

4. Gruppe: Ovicaprinae. Die ältesten Gattungen (†Oioceros, †Bucapra, †Pseudobos) erscheinen im Unterpliozän Eurasiens. Die ersten Ziegen (Capra) treten im Unterpliozän Ostindiens auf, die ersten Wildschafe (Ovis) im Plistozän Europas.

5. Gruppe: Ovibovinae. Der Moschusochse gehört einer Unterfamilie der Aegodontia an, die nur durch wenige fossile Vertreter aus dem Plistozän Europas und Nordamerikas bekannt ist.

2. Unterfamilie: Boodontia.

Wahrscheinlich hat sich dieser in Afrika und Eurasien heimische Stamm in der Miozänzeit von geweihlosen Cervicorniern abgezweigt.

1. Gruppe: Cephalophinae. Zuerst im Unterpliozän Asiens, lebend (Boselaphus, Tetraceros) in Indien und Afrika (Cephalophus).

† 2. Gruppe: Pseudotraginae. Dieser älteste Stamm der Cavicornier erscheint zuerst im Mittelmiozän von Mitteleuropa (†Eocerus, †Protragocerus), ist im Unterpliozän bis Indien und China verbreitet gewesen und noch in dieser Zeit erloschen.

3. Gruppe: Bubalidinae. Heute auf Afrika beschränkt, im Unterpliozän Europas, Kleinasiens und Indiens durch †Prodamaliscus und †Criotherium vertreten; die noch lebende Gattung Damaliscus schon im indischen Unterpliozän.

4. Gruppe: Hippotraginae. Lebend in Afrika, fossil vom Unterpliozän an. †Palaeoryx in der Pikermifauna Griechenlands, Südrußlands und Persiens, †Tragoreas in Samos.

5. Gruppe: Cervicaprinae. Lebend in Afrika; fossile Angehörige der Gruppe nicht sicher nachgewiesen (vielleicht im Unterpliozän Indiens).

6. Gruppe: Tragelaphinae. Lebend in Afrika, fossil vom Unterpliozän an; †Palaeoreas in der Pikermifauna Frankreichs, Griechenlands, Persiens, Chinas, †Protragelaphus in Griechenland und Persien, †Helicophora in Griechenland.

7. Gruppe: Bovinae. Die am höchsten spezialisierte Gruppe der Boodontia. Die ältesten Formen aus dem Unterpliozän Ostindiens nachgewiesen; später wanderten die Rinder nach Europa ein, nehmen im Plistozän außerordentlich an Häufigkeit zu und verbreiten sich zur selben Zeit auch in Nordamerika. Fünf Typen: Bubalus (Büffel), †Leptobos (Pliozän und Plistozän), Bibos, Bison, Taurus (Ochsen).

† XI. Ordnung: Amblypoda.

Die Amblypoden waren die größten Landsäugetiere der Eozänzeit; sehr rasch von primitiven Protungulaten (†Pantolambdiden) zu großer Spezialisationshöhe gelangt, dominieren sie bereits im Untereozän (Wasatch) durch ihre Körpergröße über die gleichalterigen Ungulaten Nordamerikas; sie erscheinen gleichzeitig in Europa, doch sind nur die †Coryphodontiden von Nordamerika ausgewandert, während die †Dinoceratiden, die im Mitteleozän in einzelnen Gattungen wie †Uintatherium die lebenden Nashörner an Größe übertrafen und fast Elefantenmaß erreichten, stets auf Nordamerika beschränkt geblieben sind.

Der Schädel der †Coryphodontiden und †Dinoceratiden ist sehr verschieden gestaltet, ebenso das Gebiß. Die Gliedmaßen sind in beiden Familien säulenförmig und elefantenartig; bei den †Coryphodontiden kommt es zu einer sekundären Plantigradie des Fußes nach Durchlaufung eines semidigitigraden Stadiums, wobei die Seitenzehen der mesaxonischen Gliedmaßen reduziert wurden, so daß bei den sekundär plantigraden Formen der Fuß reduzierte Seitenzehen aufweist. Der ganzen Unterordnung eigentümlich ist das winzige Gehirn, das somit auf einer tiefen Stufe stehen blieb. Von allen Ungulaten besaßen die †Amblypoden das kleinste Gehirn.

1. Familie: Coryphodontidae.

Der Raubtiercharakter des Pantolambdidenschädels ist auch hier noch erhalten. Eine Modifikation gegenüber der Stammgruppe zeigt die Spezialisation der Eckzähne; die oberen sind lang, sehr spitz und dolchartig, ragen bei geschlossenen Kiefern weit über den Unterrand der Unterkiefer vor und schleifen auf dem Hinterrand der unteren, stark nach vorn gerichteten Eckzähne. Der Schädel ist im Verhältnisse zum Rumpf sehr groß, die Sagittalcrista lang und kräftig. Die oberen M besitzen ein V-förmiges Außenjoch (Ectoloph) und ein gerades Vorjoch (Protoloph); an der hinteren Innenecke steht ein kleiner Hypocon. Im unteren M ist ein Metalophid und Hypolophid entwickelt, die V-form besitzen (Fig. 70).

Im Untereozän Nordamerikas sind zahlreiche †Coryphodonten gefunden worden, unter denen sich mehrere phylogenetische Reihen verfolgen lassen; einige Formen bilden den Uebergang zu den †Dinoceratidae. Die wichtigsten Gattungen sind †Coryphodon (auch in Europa. Fig. 69 und 70) und †Bathyopsis.

†2. Familie: Dinoceratidae.

Bei dieser Familie erfährt der Schäde eine Spezialisation durch die Entwickelung gewaltiger Knochenprotuberanzen auf den Nasenbeinen, Oberkiefern und Scheitelbeinen. Die oberen Schneidezähne sind verschwunden, — der obere Eckzahn ist zu einem großen, säbelförmigen Hauer geworden, der an die †Machairodontinen erinnert; ebenso wie bei diesen ist auch der Unterkiefer durch einen Lappen vergrößert, über den sich der obere Eckzahn legt. Die größten Dinoceratiden erreichten eine Körperlänge von etwa 4 m und zeigen den Habitus der Elefanten, an welche auch der Bau der fünfzehigen Gliedmaßen in physiologischer und morphologischer Hinsicht erinnert. Das Gehirn dieser großen Formen ist sehr klein. Die wichtigste Gattung ist †Uintatherium (= Dinoceras) aus dem Mittel- und Obereozän (Bridger) von Wyoming (Fig. 71). Für das Obereozän charakteristisch ist †Eobasileus (Fig 72).

XII. Ordnung: Hyracoidea (Klippschliefer).

Gebiß bei den ältesten Gattungen vollständig, bei den jüngeren reduziert, und zwar betrifft



Fig. 69. †Coryphodon teste aus dem Untereozän (Wasatch) von Wyoming. In $^1/_8$ natürlicher Größe. Neue Rekonstruktion auf Grundlage der Zeichnungen von H. F. Osborn.

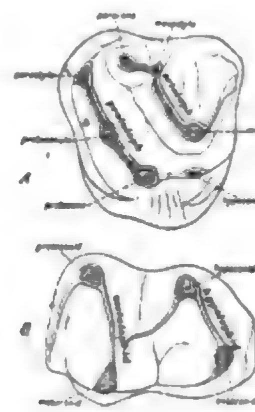


Fig. 70. Schema eines oberen Molaren (A) und eines unteren Molaren (B) von †Coryphodon. Nach H. F. Osborn.

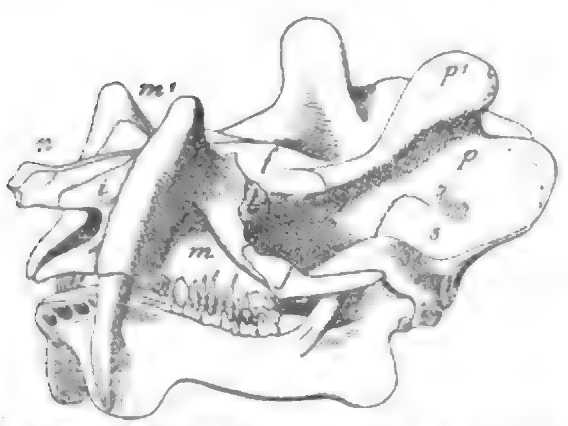


Fig. 71. Schädel von †Uintatherium mirabile aus dem Eozän von Wyoming. $^1/_{12}$ natürlicher Größe. Nach O. C. Marsh.

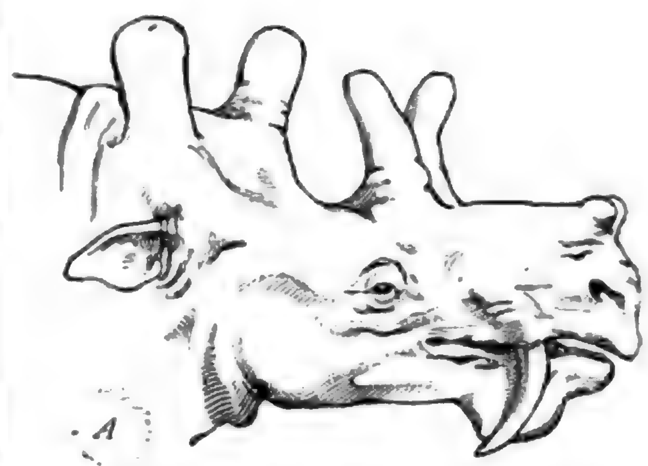


Fig. 72. Schädel von †Eobasileus. Rekonstruiert von Ch. Knight. Aus H. F. Osborn, The Age of Mammals 1910.

die Reduktion zuerst den Verlust der C, dann die hinteren I (I^2 I^3 und I_3). I^1 nagezahnartig, I_1 und I_2 meißelförmig. Bis vor kurzem nur durch die lebende Gattung Procavia bekannt, wurden im letzten Jahrzehnt zahlreiche fossile Gattungen in Aegypten entdeckt, wo sie zuerst im Oligozän auftreten. Diese fossilen Gattungen (†Geniohyus, †Bunohyrax, †Mixohyrax, †Pachyhyrax, †Saghatherium, †Megalohyrax) gehören ebenso wie eine unterpliozäne Gattung von Pikermi und Samos (†Pliohyrax) der Familie der †Saghatheriidae an, während von den echten Hyracidae außer Procavia noch keine Gattung bekannt ist. Die Molaren zeigen alle möglichen Uebergänge von bunodonten bis zu lophodonten Typen, die schließlich rhinocerotidenartigen Bau der Krone erhalten.

†XIII. Ordnung: Embrithopoda.

Im Oligozän Aegyptens wurde vor etwa zehn Jahren eine höchst merkwürdige Ungulatengattung entdeckt (†Arsinoitherium), deren einseitige Spezialisation dazu zwang, für sie nicht nur eine eigene Familie (†Arsinoitheriidae), sondern auch eine selbständige Ordnung zu er-

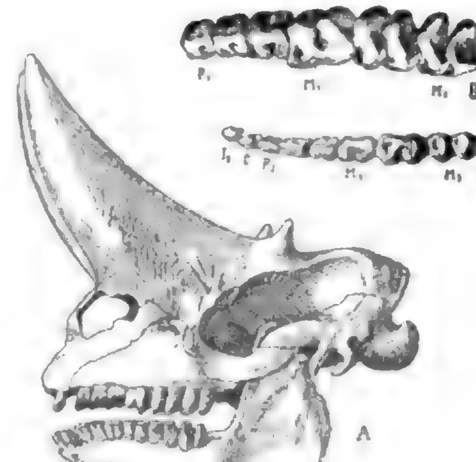


Fig. 73. A Schädel, B obere, C untere Backenzähne von †Arsinoitherium Zitteli aus dem Unteroligozän des Fayûm, Aegypten. A in $^1/_{18}$, B und C in $^1/_9$ natürlicher Größe. Nach C. W. Andrews.

richten. Das auffallendste Merkmal von †Arsinoitherium sind zwei mächtige, nach vorn schräg in die Höhe gerichtete Schädelzapfen, die sich von den Nasenbeinen aus erheben, während an ihrem hinteren Ende zwei kurze, kleine Zapfen von den Stirnbeinen entspringen. Die Schädelachse ist sehr schräg zur Wirbelsäule geneigt gewesen, so daß die Hörner fast horizontal standen. Obere und untere Molaren aus zwei V-förmigen Kämmen zusammengesetzt, deren vorderer Schenkel verkümmert ist. Der Gliedmaßenbau erinnert in vielen Einzelheiten an die Proboscidier; in anderen Merkmalen schließt sich †Arsinoitherium an die Hyracoidea an; mit den †Amblypoda besteht dagegen viel weniger Uebereinstimmung imSkelettbau. †Arsinoitherium ist wahrscheinlich aus einer Ahnenform hervorgegangen, die in der Mitte zwischen den Hyracoidea und Proboscidea steht.

XIV. Ordnung: Proboscidea (Rüsseltiere).

Die Proboscidea sind heute im Aussterben begriffen und haben ihre Blütezeit im oberen Tertiär und in der Eiszeit erreicht. Schon frühzeitig entwickelten sie sich zu Formen von bedeutender Körpergröße; zahlreiche Spezialisationen bedingen ihre selbständige Stellung unter den übrigen Ungulaten, unter denen nur die †Embrithopoda und vor allem die Sirenia in näherer verwandtschaftlicher Beziehung mit ihnen stehen.

Das Gebiß der Proboscidier hat in allen Stämmen weitgehende Modifikationen erlitten. Nur bei der ältesten Gattung †Moeritherium ist das Gebiß noch fast vollständig, doch ist schon bei dieser obereozänen Gattung aus Aegypten (ob noch jüngere Arten im Miozän Indiens lebten, ist sehr zweifelhaft) der untere $I_{\overline{3}}$, der untere C, sowie der obere und untere P_1 verloren gegangen. Ferner ist bei †Moeritherium bereits der untere I_2 ebenso wie der obere I^2 vergrößert, so daß die älteste bekannte Proboscidiergattung zwar deutlich den Weg erkennen läßt, auf dem sich die Spezialisation der jüngeren Stämme vollzogen hat, aber von der Ahnenform so weit entfernt ist, daß wir über die Herkunft der Rüsseltiere von primitiveren, mit den Sirenen gemeinsamen Ahnen auch heute nur auf Vermutungen angewiesen sind.

Die Schneidezähne der Proboscidier werden sehr frühzeitig auf das obere und untere zweite Paar reduziert; im Stamm der †Tetrabelodontiden und bei den Elephantiden geht das untere zweite Schneidezahnpaar im Laufe der Stammesgeschichte verloren. Die im Zwischenkiefer übrigbleibenden „Stoßzähne" bestehen aus dichtem, elastischem Elfenbein, das im Querschnitt eine guillochierende Anordnung von Linien zeigt. Auf dem hinteren Teil der Stoßzähne ist meist eine dünne Emailschichte erhalten.

Die Backenzähne der Proboscidier erfuhren eine Spezialisation nach zwei verschiedenen Richtungen. Ursprünglich oligobunodont, werden sie frühzeitig polybunodont; die Backenzähne erhalten immer mehr die Charaktere von Schweinemolaren, so daß man von einem suiden Molarentypus sprechen kann. Dieser Typus ist bei den †Tetrabelodontiden am schärfsten ausgeprägt. Zu einer wirklichen Hypselodontie ist es bei den bunodonten Proboscidiern nur im Stamme der †Desmostyliden gekommen, die bisher nur durch einen Schädel aus dem Tertiär Japans und durch Zähne aus Kalifornien bekannt sind. Eine andere Spezialisationsrichtung der Backenzähne hat gleichfalls mit den bunodonten Typen begonnen, doch haben sich hier die Backenzähne immer mehr durch Anordnung der Haupthöcker in Querjochen zu einem lophodonten Typus entwickelt, den man als den tapiroiden dem suiden gegenüberstellen kann. Aus diesen oligolophodonten Backenzahnformen entstanden durch Neubildung von Jochen am Hinterende der Zähne polylophodonte Zahntypen, die in den Molarenformen von Elephas das Ende ihrer Spezialisation erreichen, welche ebenso wie unter den bunodonten Formen bei den †Desmostyliden auch hier in hypselodonten Molaren gipfelt. Dabei kommt es zur Ausbildung von Zahnzement in den Zwischentälern der Joche, deren Zahl beim Mammut auf 27 steigen kann.

Die Zahl der Molaren ist selbst bei den höchstspezialisierten Formen drei geblieben. Ursprünglich sind drei P vorhanden, doch verschwindet späterauch P_2. Endlich gehen bei den meisten Tetrabelodontiden und den Elephantiden alle P verloren, so daß überhaupt nur die Milchmolaren und die derselben Dentition angehörenden „bleibenden Molaren" zur Ausbildung gelangen. Bei den ältesten Proboscidiern wie †Moeritherium, †Palaeomastodon, ferner bei †Dinotherium und †Desmostylus stehen die Backenzähne noch in einer Reihe hintereinander. In dem Maße aber, in dem sich die Zähne vergrößern, rücken die Zähne erst nacheinander in die Kaufläche ein; schon bei †Mastodon und†Tetrabelodon sind nie mehr als drei Backenzähne gleichzeitig in Funktion, später nur zwei, bei den letzten Stufen des Elephantidenstammes nur einer, wenn die letzten Reste seines Vorgängers aufgebraucht sind und der folgende noch nicht in die Kaufläche eingerückt ist. Dieses Nachschieben der Zähne endet erst in höherem Lebensalter, da der letzte, sehr große M_3 sehr spät erscheint. Die Zähne werden zuerst am Vorderende angekaut.

Weitgehende Veränderungen erfuhr der Schädel im Laufe der Stammesgeschichte. Zu den auffallendsten Eigentümlichkeiten gehört die Ausbildung mächtiger Luftzellen im Frontale und die mit der Ausbildung der Stoßzähne in Verbindung stehende Verschiebung der Nasenlöcher nach oben.

Ein weitverbreiteter Irrtum ist das angebliche Fehlen der Markhöhlen in den Extremitätenknochen, deren Vorhandensein durch einen Querschnitt sofort nachweisbar ist. Die Ulna ist sehr kräftig, am Unterende sogar stärker als der Radius. Die Carpalia stehen ursprünglich „alternierend", später in „serialer" Anordnung.

Heute leben die Rüsseltiere nur im tropischen Südasien und in Afrika, waren jedoch in früherer Zeit weit verbreitet und lebten in der Eiszeit in ganz Eurasien bis zum nördlichen Eismeer, in Nordamerika mit Ausnahme des Nordostens, in Südamerika bis nach Argentinien und gingen hoch in die Anden hinauf. Die Heimat und das Entstehungszentrum der Rüsseltiere ist Afrika: von hier gelangten sie im Untermiozän nach Europa und Asien, und im Mittelmiozän nach

Nordamerika; von hier wanderten sie im Pliozän nach Südamerika ein.

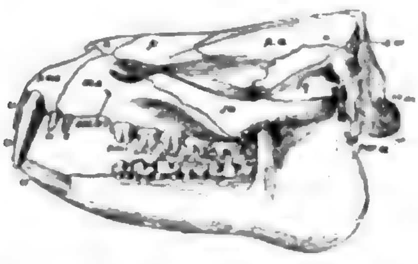


Fig. 74. Schädel von †Moeritherium Lyonsi, rekonstruiert. Obereozän des Fajûm, Aegypten. Etwa $^1/_{10}$ natürlicher Größe. Nach C. W. Andrews.

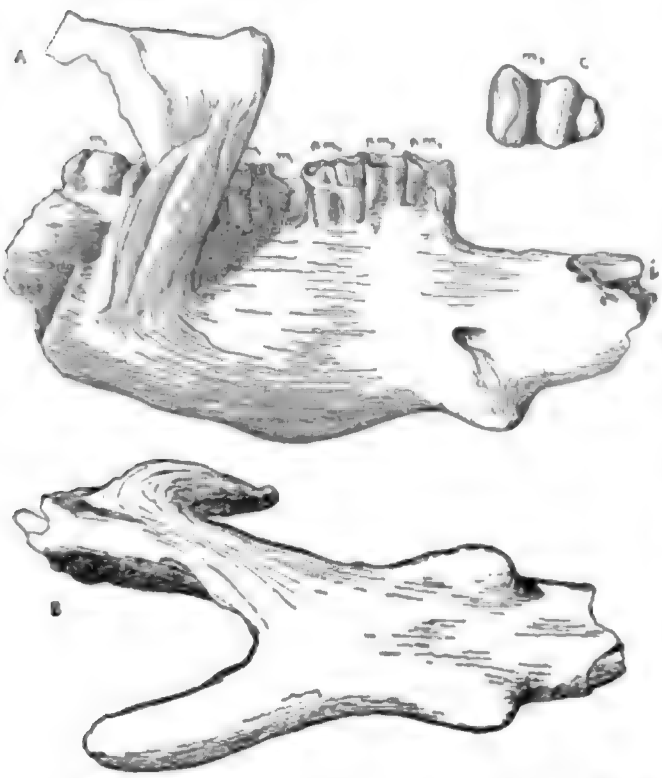


Fig. 75. Barytherium grave. Obereozän des Fajûm, Aegypten. A Unterkiefer von rechts, B von unten, C letzterer unterer linker M_3. In $^1/_6$ natürlicher Größe. Nach C. W. Andrews.

†1. Familie: Moeritheriidae.

Gebiß bereits reduziert auf $\frac{3.1.3.3}{2.0.3.3}$, oberer I^2 und unterer I_2 vergrößert, der obere hauerartig. P und M oligobunodont oder oligolophodont, brachyodont. Schädeldach niedrig, mit breit ausladendem Jochbogen. †Moeritherium (ungefähr so groß wie Tapir) im Obereozän und Unteroligozän Aegyptens, vielleicht auch im Oberoligozän oder Untermiozän Ostindiens (Fig. 74).

†2. Familie: Barytheriidae.

Unvollständig bekannt; unterer J_2 sehr groß, fast horizontal nach vorn abstehend. Größe die eines Dinotherium. Unterkiefer sehr massiv, mit zwei nach unten gerichteten stumpfen Höckern, Symphyse sehr lang, aufsteigender Kieferteil sehr hoch und steil. Backenzähne oligolophodont, dinotherienähnlich. Nur eine Gattung (†Barytherium) aus dem Obereozän Aegyptens bekannt (Fig. 75).

†3. Familie: Dinotheriidae.

Gebiß stark reduziert: alle oberen Schneidezähne, obere und untere Eckzähne, sowie I_1 und I_3, ferner P_1 und P_2 oben und unten verloren gegangen $\left(\frac{0.0.2.3}{1.0.2.3}\right)$. Unterkiefersymphyse stark nach unten gebogen, mit mächtigen, nach hinten umgebogenen kegelförmigen Hauern. Backenzähne lophodont, M_1 oben und unten mit je drei, die übrigen mit je zwei Querjochen, die Backenzähne in geschlossener Reihe, normaler Zahnwechsel. Nur eine Gattung, †Dinotherium, die zuerst im Untermiozän von Karungu am Victoria Nyanza mit einer kleinen Art (†Dinotherium Hobleyi) auftritt, im Mittelmiozän mit einer kleinen Art (†Dinotherium bavaricum) in Europa und einer gleichfalls kleinen Art (†Dinotherium indicum) in Ostindien erscheint und sich im Unterpliozän zu gewaltiger Größe entwickelt (†Dinotherium giganteum und †Dinotherium gigantissimum). †Dinotherium geht bis nach Indien, wo es aber ebenso wie in Europa schon im Unterpliozän ausstirbt.

†4. Familie: Palaeomastodontidae.

Nur durch eine Gattung im Oligozän Aegyptens vertreten. Die einseitige Spezialisation des unteren zweiten Schneidezahnpaares zu einer Schaufel zwingt zu der Abtrennung dieses Seitenzweiges der Proboscidier von den Tetrabelodontiden und Elephantiden, denen †Palaeomastodon im Bau des M sonst sehr nahe steht

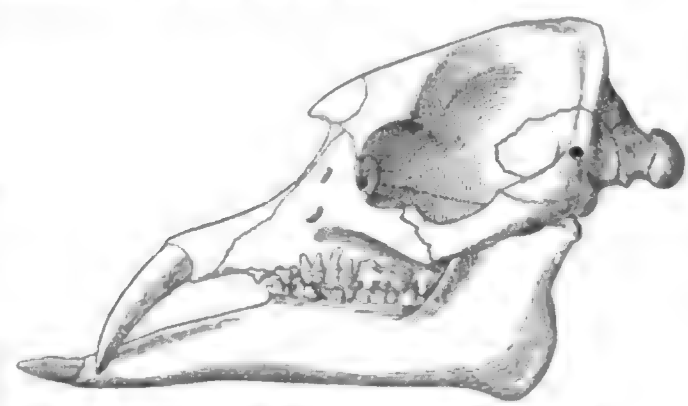


Fig. 76. Schädel von Palaeomastodon Beadnelli. Unteroligozän des Fayûm (Aegypten). $^1/_{12}$ natürlicher Größe. Nach C. W. Andrews.

†Palaeomastodon. (Fig. 76) Oligozän Aegyptens. Zahnformel $\frac{1.0.3.3}{1.0.2.3}$; hintere P zweijochig, M dreijochig, bunodont und brachyodont. Obere I^2 kurz, abwärts gekrümmt, die unteren I_2 nicht anschleifend, welche als Schaufeln ausgebildet sind, Symphyse des Unterkiefers lang. Schädel hoch, kurz, mit Sagittalcrista. Oligozän Aegyptens. †Palaeoma-

stodon ist wahrscheinlich aus dem bunodonten †Moeritherium Lyonsi hervorgegangen.

5. Familie: Elephantidae.

Obere I als große gerade oder als nach oben eingerollte und divergierende Stoßzähne entwickelt; untere I zuerst kurz, in sehr langer Symphyse eingepflanzt, später verlängert und Symphyse verkürzt, bis sie schließlich wieder zurückgebildet werden und ganz verschwinden. Die M ursprünglich entweder bunodont (suid) oder lophodont (tapiroid); aus den zuerst oligolophodonten Molarentypen entstanden zunächst polylophodonte und aus diesen entwickelte sich der Molarentyp, den wir bei den lebenden Elephantiden antreffen. Ursprünglich ist der Zahnwechsel normal, später werden die P des Ersatzgebisses unterdrückt.

†Tetrabelodon umfaßt eine große Zahl von Arten, die zuerst im Untermiozän auftreten (im Cartennien von Algier und im Burdigalien von Europa †Tetrabelodon pygmaeum; in der Gaj Series in Ostindien (Bugti Hills) †Tetrabelodon (Hemimastodon) crepusculi); aus †Tetrabelodon pygmaeum ging in Afrika und Europa das mittelmiozäne †Tetrabelodon angustidens hervor, aus dem sich einerseits die Reihe der bunodonten, andererseits die Reihe der lophodonten Formen entwickelte, welch letztere zu Elephas führen. Noch bei †Tetrabelodon angustidens (Fig. 77, a) zeigen manche Individuen mehr tapiroiden Charakter der Molaren, der sich über †Tetrabelodon tapiroides und †Tetrabelodon Borsoni (Unterpliozän) in einen Stamm fortsetzt, der mit †Tetrabelodon (Mastodon) americanum (Fig. 40, B, 77 b) in der Eiszeit Nordamerikas erlischt.

Die bunodonten Formen, die in dem Subgenus †Bunolophodon vereinigt werden, führen in geschlossener Ahnenreihe (Fig. 79) von †Tetrabelodon angustidens (Mittelmiozän und Obermiozän) zu †Tetrabelodon longirostre (Unterpliozän) und erlöschen in Europa mit †Tetrabelodon arvernense im Oberpliozän. Ein anderer Stamm wanderte in Nordamerika ein (†Tetrabelodon productum), führte zu dem merkwürdigen †Tetrabelodon dinotherioides (Fig. 78) mit weit herabgebogener Unterkiefersymphyse und erlosch mit den südamerikanischen andinen Arten der Eiszeit (†Tetrabelodon andium, †Tetrabelodon Humboldti). Die Funktion der Bunolophodonmolaren war im wesentlichen eine mahlende, im Gegensatz zu der zerquetschenden der tapiroiden Molaren, die der Subgattung †Loxolophodon eigentümlich sind. Aus diesen lophodonten Formen sind über †Tetrabelodon latidens in Ostindien im Pliozän die echten Elefanten entstanden.

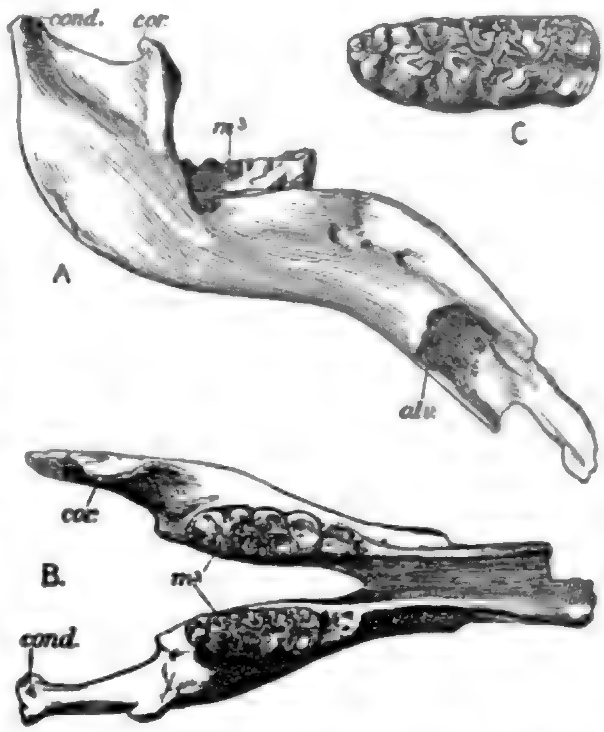


Fig 78. †Tetrabelodon dinotherioides aus dem obersten Pliozän von NW-Kansas. A Unterkiefer von der Seite, B von oben in $^1/_{18}$ natürliche Größe. C unterster letzter rechter Molar in $^1/_6$ natürlicher Größe. Nach C. W. Andrews, 1909.

Elephas erscheint zuerst mit der erloschenen Subgattung †Stegodon im Pliozän Ostindiens. Bei diesem sind, wie dies übrigens auch in der Reihe der bunodonten Tetrabelodontiden bei †Tetrabelodon arvernense und unter den lophodonten bei †Mastodon americanum der Fall ist, die unteren Stoßzähne bereits verkümmert. Die Molaren sind polylophodont geworden und zwar steigert sich die Zahl der Joche, die Hypsodontie und die Zementausfällung in den Tälern von Stufe zu Stufe. Aus den Stegodonten gingen noch im Mittelpliozän die Untergattungen Euelephas und Loxodon hervor; der indische Elefant gehört der ersten, der afrikanische der zweiten Untergattung an. Im Oberpliozän Europas erscheint Elephas (Archidiscodon) meridionalis, das größte Landsäugetier, das jemals lebte, und das aus Elephas (Archidiscodon) planifrons hervorging; später erscheint in Europa Elepha (Loxodon) antiquus, der somit einer ganz anderen Stammesreihe als das Mammut angehört und der von manchen Autoren als der

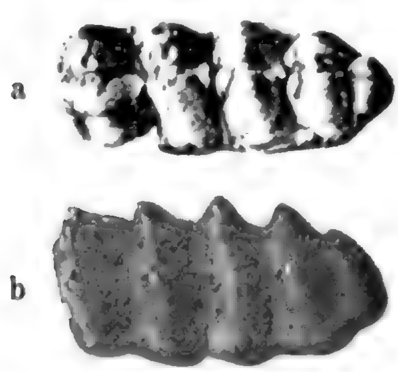


Fig. 77. a letzter unterer linker Molar (M_3) von Tetrabelodon angustidens. †Miozän der Herzegowina (suider Typus). Zahnlänge 165 mm. Nach A. Hofmann, 1909.

b letzter oberer Molar ($M\underline{1}$) von †Mastodon americanum. Plistozän von Maryland, Nordamerika (tapiroider Typus). Zahnlänge 180 mm. Nach F. A. Lucas, 1906.

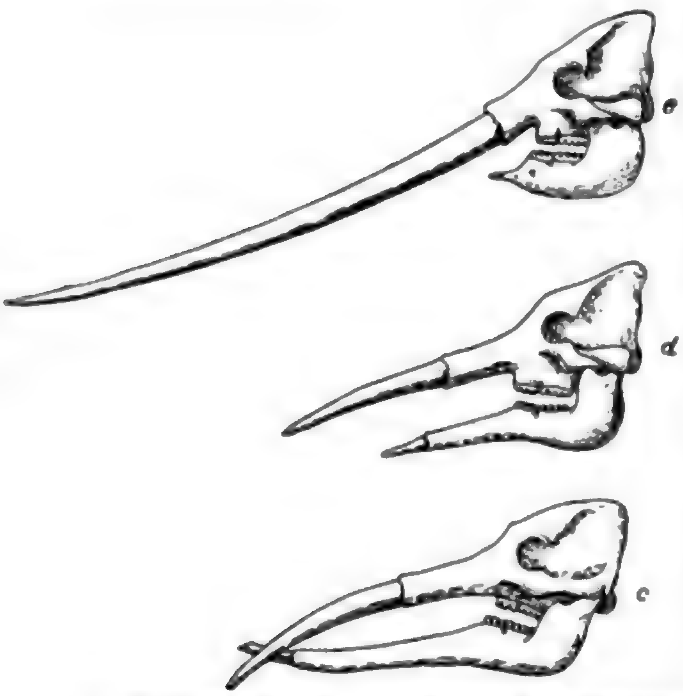


Fig. 79. Ahnenreihe von †Tetrabelodon arvernense. e †Tetrabelodon angustidens. Miozän Nordafrikas und Europas. Nach C. W. Andrews. d †Tetrabelodon longirostre. Unterpliozän Europas. Nach O. Abel. c †Tetrabelodon arvernense. Oberpliozän Europas. Nach O. Abel.

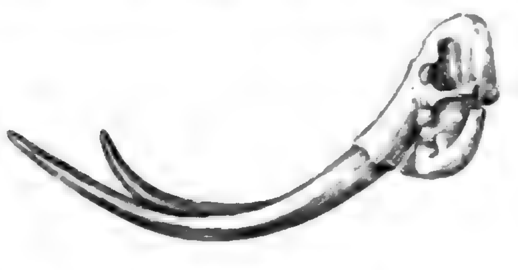


Fig. 80. Schädel von †Stegodon ganesa aus dem Unterpliozän der Siwalik Hills, Indien. 1/64 natürlicher Größe. Aus dem Guide to the Fossil Mammals and Birds, Brit. Mus. Nat. Hist. London, 1909.

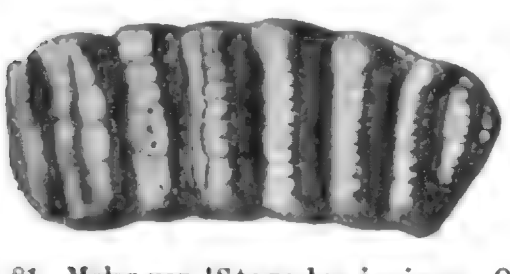


Fig. 81. Molar von †Stegodon insigne. Oberpliozän von Fokien, China. 1/6 natürlicher Größe. Nach M. Schlosser.

Stammvater der „Zwergrassen" auf den Mittelmeerinseln angesehen wird (†Elephas Falconeri, †Elephas mnaidriensis, †Elephas melitensis usw.) im Plistozän Siziliens, Kretas, Maltas usf.).

Das Mammut (†Elephas (Euelephas) primigenius), das in der Eiszeit in Eurasien überaus häufig war, ging aus †Elephas meridionalis über die Zwischenform †Elephas trogontherii hervor.

Bei der Wichtigkeit der vier Arten †Elephas meridionalis, †Elephas antiquus, †Elephas trogontherii und †Elephas primigenius mögen die Unterschiede der Molaren dieser Arten hier angeführt werden (nach Wolfgang Soergel, 1912, gekürzt):

1. †Elephas meridionalis. (Fig. 40, A). Niedrige, meist breite M mit wenig Schmelzlamellen. Breite Schmelzfiguren, oft unregelmäßig verzerrt, mit vielen groben Zacken; Schmelzfiguren und Zementintervalle sehr lang, Schmelz stark. Form der Kaufläche meist oval rundlich. Lamellenformel des letzten M: $\frac{M^3\ 11-15}{M_3\ 11-13\ (15?)}$

2. †Elephas antiquus. Hohe, schmale M; Zahl der Schmelzbüchsen größer als bei meridionalis; Schmelzfiguren regelmäßig, rhombisch, mitunter fast rechteckig; Schmelzfiguren und Zementintervalle meist lang. Schmelz stark, gefältelt, häufig über das Zement herausragend; Kauflächenform schmal, rechteckig, bandförmig. Lamellenformel des M_3

$$\frac{M^3\ 14-19}{M_3\ 15-20\ (?)}.$$

3. †Elephas trogontherii. Sehr variable Zwischenform. M meist hoch und schmal, mitunter auch niedrig und breit, Zahl der Schmelzbüchsen wie bei antiquus, manchmal etwas mehr. Schmelzfiguren meist regulär, breit bandförmig, selten etwas rhombisch. Länge der Schmelzfiguren und Zementintervalle schwankend, je nachdem er dem Stammvater meridionalis oder dem jüngeren primigenius näher steht. Schmelzstärke schwankend. Form der Kaufläche teils oval, teils birnenförmig bis rechteckig. Lamellenformel wie antiquus.

4. †Elephas primigenius (Mammut). M hoch, breit oder ziemlich schmal. Zahl der Schmelzbüchsen von allen vier Arten am größten. Schmelzfiguren schmale Bänder, median oft aufgebauscht, selten rhombisch. Schmelzfiguren und Zementintervalle sehr kurz. Schmelz sehr dünn. Form der Kaufläche oval, selten rechteckig. Lamellenformel des M_3:

$$\frac{M^3\ 18-27}{M_3\ 18-24}.$$

Das eiszeitliche Mammut wird im südlichen Nordamerika durch einen gewaltigen Elefanten, †Elephas imperator, vertreten; im mittleren Nordamerika lebte †Elephas Columbi, während †Elephas primigenius nur im nördlichen Teile Nordamerikas lebte.

Der lebende indische Elefant entstand aus Elephas planifrons über Elephas hysudricus, während der afrikanische direkt von den Stegodonten abgeleitet werden muß.

†6. Familie: Desmostylidae.

Im oberen marinen Tertiär (Pliozän?) oder Plistozän von Kalifornien und Oregon sowie im marinen Miozän(?) von Japan sind Reste eines sehr merkwürdigen Säugetiers entdeckt worden, deren systematische Stellung längere Zeit hindurch unsicher war. Die auffallendsten Merkmale zeigt das Gebiß. Die Zwischenkiefer tragen je einen nach vorn gerichteten Stoßzahn, der Unterkiefer jederseits zwei, und zwar einen großen äußeren und einen kleineren inneren

(ähnlich wie Hippopotamus). Die Backenzähne sind hochgradig hypsodont und bestehen aus locker aneinander gefügten Zylindern mit dickem Schmelzbelag; wahrscheinlich besteht jeder Backenzahn aus 12—15 solcher Zylinder, die in zwei longitudinalen Reihen angeordnet sind. Die Zahl der Backenzähne ist unsicher, da der Schädel aus der Provinz Mino (Japan) einem jungen Tiere angehörte. Wahrscheinlich war das Gebiß im Backenzahnabschnitt vollständig. Der Schädel ist sehr schmal und niedrig, die Schnauze gerade nach vorn gestreckt und verlängert. Alle Merkmale weisen darauf hin, daß die Gattung einem einseitig spezialisierten Seitenzweig der Proboscidier angehört, der wahrscheinlich an das Meeresleben angepaßt war. Nur eine Gattung, †Desmostylus (Desmostylus hesperus Marsh 1888 = „A new fossil Mammal of Japan" Joshiwara & Iwasaki 1902).

V. Ordnung: Sirenia.

Ursprünglich mit vollzähligem Gebiß und vollständigem Milchgebiß $\left(\frac{3.1.4.3}{3.1.4.3}\right)$. Später verkümmern die P des Ersatzgebisses, und zwar beginnt diese Reduktion mit dem $P^{\underline{4}}$ und schreitet nach vorn, bis auch der letzte P verschwindet. Obere M ursprünglich sechshöckerig (Hypocon), alle Höcker V-förmig, bunodont und brachyodont. Ursprüngliche Molarenform bei Manatus erhalten. Untere M ursprünglich vierhöckerig, langgestreckt, mit großem Talonid. Bei den Halicoriden entsteht durch Ausbildung von Sperrhöckern in den Tälern ein suider Molarentypus. P ursprünglich oben und unten einwurzelig, konisch; an der Hinterwand innen und außen je zwei übereinander stehende Höcker (somit P fünfhöckerig), später lösen sich die Höcker der Hinterwand in zwei perlschnurartig gekörnte Leisten auf. Drei Milchmolaren; durch die Unterdrückung der P des Ersatzgebisses bleiben die Milchbackenzähne lange Zeit persistent. Bei den Manatiden findet ein ununterbrochener Ersatz der Backenzähne statt, von denen gleichzeitig elf jederseits funktionieren; die Gesamtzahl der in großen Keimsäcken am Hinterende der Zahnreihe gebildeten M wurde auf 180 berechnet. Im Unterkiefer verschwinden die fünf vordersten Zähne schon im Eozän (bei †Eosiren), werden aber embryonal auch noch bei den lebenden Formen angelegt, so daß bei diesen die Alveolen der I, des C und des $P_{\overline{1}}$ auf dem abgeknickten und verbreiterten Symphysenteil auch am erwachsenen Tiere sichtbar sind. I^1 bei den Halicoriden als Stoßzahn entwickelt, bei den Manatiden ist der Zwischenkiefer zahnlos. Bei den Halicoriden ist der vordere Kieferteil sehr stark herabgebogen. Nasenbeine ursprünglich groß, später rudimentär, Lacrymale ursprünglich mit Tränenkanal, später geschlossen. Gehirn sehr einfach gebaut. Skelett schon bei den ältesten Sirenen wenigstens im vordersten Abschnitte des Thorax pachyostotisch, vordere Rippen enorm verdickt; später greift die Verdickung auch auf den hinteren Teil des Thorax und die Wirbel über. Arme zu Flossen verwandelt, Hinterextremität verkümmert und bei den jüngsten Formen (Halicore, †Rhytina [†im 18. Jahrhundert], Manatus) hochgradig rudimentär. Die Sirenen sind seit dem Mitteleozän an das Meeresleben angepaßt, haben aber mit Ausnahme weniger

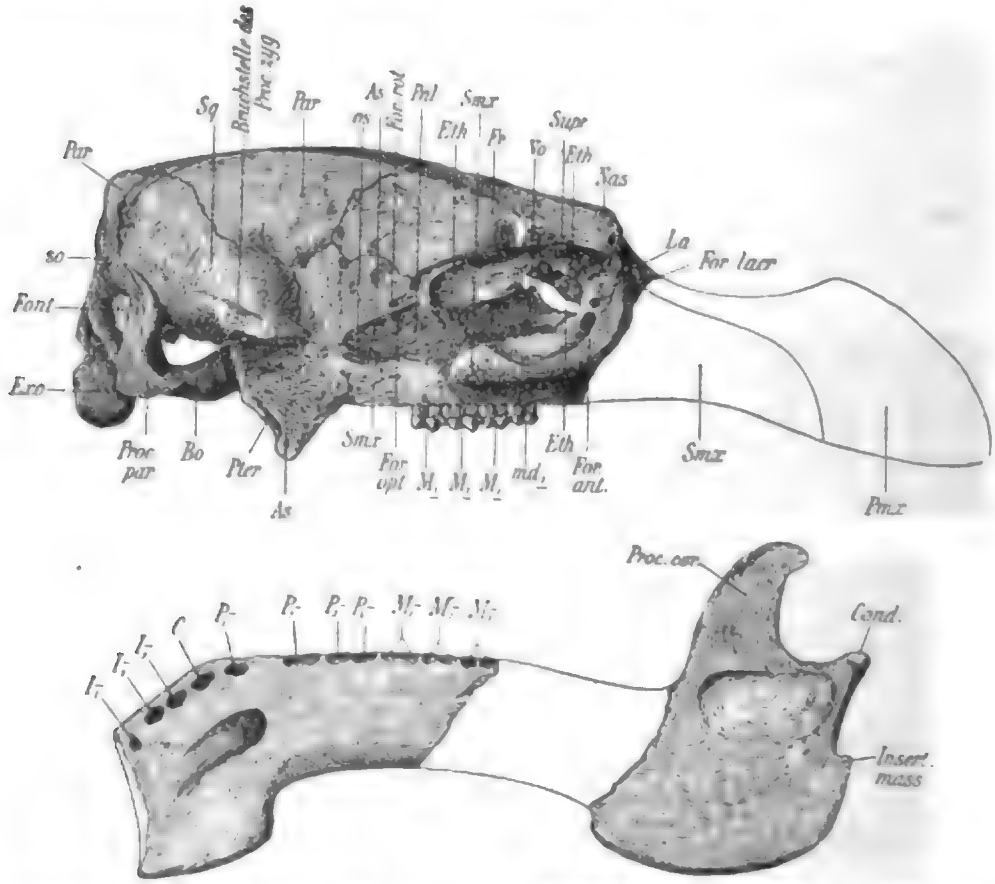


Fig. 82. †Eotherium aegyptiacum aus dem Mitteleozän Aegyptens. Schädel von rechts, Unterkiefer von links. $^1/_2$ natürlicher Größe. O. Abel 1912.

Merkmale seit dieser Zeit keine durchgreifenden Veränderungen erfahren. Die beiden Familien sind schon seit früher Zeit voneinander getrennt. Das Entstehungszentrum der Sirenen war die Mittelmeerregion, wo sie seit dem Oberpliozän erloschen sind; heute leben die Manatiden im Gebiete des Atlantik, die Halicoriden im Roten Meere, Indik und Pazifik; †Rhytina ist auf die Behringsinsel beschränkt gewesen und in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts erloschen.

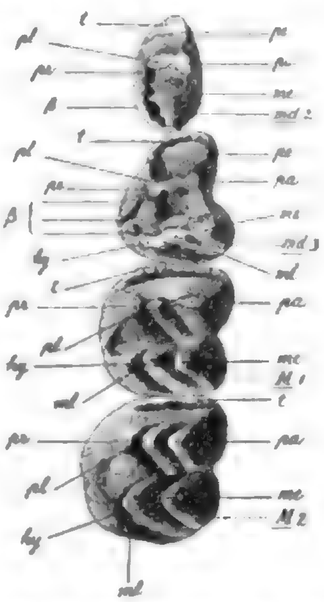


Fig. 83. Linke Backenzähne (die drei Milchmolaren und der erste Molar) von †Mesosiren Dolloi. Mitteleozän von Vicenza, Oberitalien. Natürliche Größe. O. Abel 1906.

1. Familie: Halicoridae.

†Eotherium. Gebiß und Zahnwechsel vollständig. Mitteleozän von Aegypten (†Eotherium aegyptiacum).

†Mesosiren. Nur dürftige Reste (Oberkiefermolaren) bekannt. Mitteleozän Oberitaliens (†Mesosiren Dolloi).

†Paraliosiren. Mitteleozän Oberitaliens. Höher spezialisiert und größer als Mesosiren. (†Paraliosiren Suessi).

†Protosiren. Mitteleozän Aegyptens. Von †Eotherium durch den Bau des letzten M3 sowie durch den Schädelbau verschieden. †Protosiren führt zu †Archaeosiren aus dem Obereozän Aegyptens und zu †Miosiren aus dem belgischen Miozän (Protosiren Fraasi).

†Eosiren. Obereozän Aegyptens. Reduktion des Gebisses weiter als bei †Eotherium vorgeschritten; Zwischenglied zwischen †Eotherium und †Halitherium (†Eosiren libyca).

†Prototherium. Mitteleozän Oberitaliens. Mit Eosiren nahe verwandt (†Prototherium veronense).

†Halitherium. Im Oligozän Mitteleuropas häufig (†Halitherium Schinzi); im Miozän in †Metaxytherium übergehend. Hier sind die P des Ersatzgebisses, die bei †Halitherium noch mit Ausnahme des P 4 vorhanden waren, ganz unterdrückt, so daß die Milchmolaren bis zur gänzlichen Abnutzung in Funktion bleiben. Die Molaren werden durch Hinzutreten neuer Sperrhöcker in den Tälern und am Hinterende der Krone immer suidenähnlicher. Aus †Metaxytherium, das im Miozän in Europa weit verbreitet war, ging im Pliozän

†Felsinotherium hervor, dessen M polybunodont sind. †Eotherium, †Eosiren, †Prototherium, †Metaxytherium und †Felsinotherium bilden eine geschlossene Ahnenreihe, die im Oberpliozän ausstirbt. Eine Seitenlinie der Halicoriden repräsentieren †Protosiren, †Archaeosiren und †Miosiren, die im Miozän Belgiens erlischt. Ein weiterer Seitenzweig der Halicoriden ist durch †Rhytiodus aus dem Miozän Frankreichs repräsentiert.

Die lebende Gattung Halicore steht in manchen Punkten †Eotherium nahe, ist aber nicht als dessen Nachkomme zu betrachten, sondern gehört einem frühzeitig abgezweigten Stamme

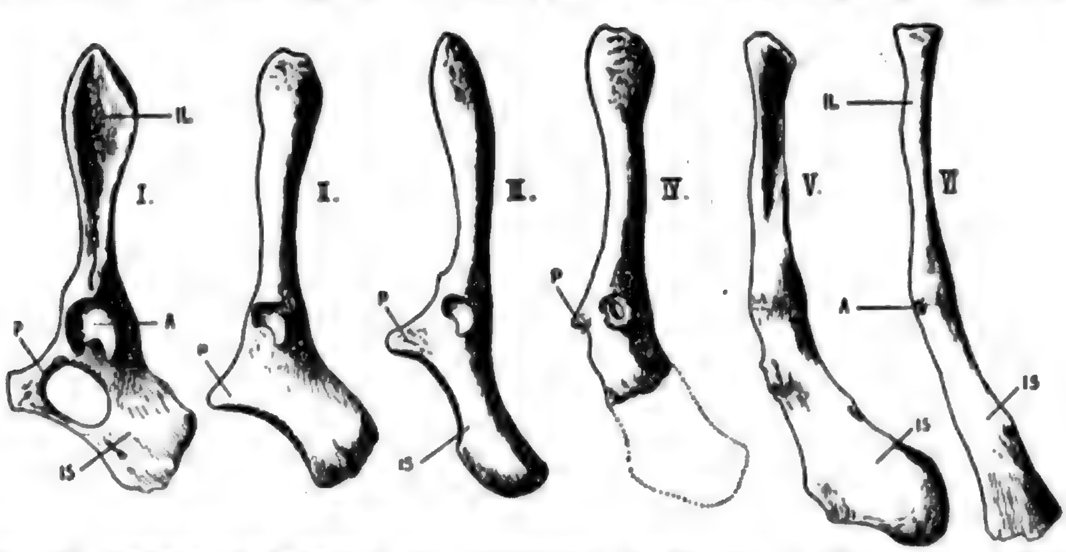


Fig. 84. Die stufenweise Reduktion der Hüftbeine der Sirenen. I †Eotherium. Mitteleozän. II †Eosiren. Obereozän. III †Halitherium. Oligozän. IV †Metaxytherium. Miozän. V Halicore dugong. Holozän. VI Halicore tabernaculi. Holozän. IL Ilium, P Pubis, Is Ischium, A Acetabulum. Nach O. Abel 1906.

der Halicoriden an. Nahe verwandt mit Halicore ist die erloschene †Rhytina von der Behringsinsel, bei der das ganze Gebiß verkümmert war.

2. Familie: Manatidae.

Von den Halicoriden schon im Mitteleozän getrennt. Die älteste Manatidengattung ist †Prorastomus aus dem Eozän Jamaikas, die durch starke Entwickelung des oberen C auffällt. Sie gehört nicht in die Ahnenreihe von Manatus, hingegen wahrscheinlich †Manatherium aus dem belgischen Oligozän.

†XVI. Ordnung. Pyrotheria.

Auf das Tertiär Patagoniens beschränkt; die Pyrotherien erlöschen im Miozän. Sie erreichten die Größe von Elefanten und wurden wegen der Aehnlichkeit ihrer Molaren mit jener von Dinotherium für Proboscidier gehalten. Der Schädel (unvollständig bekannt) muß außerordentlich kurz gewesen sein, da die Backenzähne knapp hinter den Schneidezähnen beginnen; Orbita über P^4 gelegen. Im oberen Gebiß keine I vorhanden. Oberarm länger als Unterarm, Oberschenkel länger als Unterschenkel. Nach Gaudry Grabtiere. Die Herkunft der †Pyrotheria ist noch vollständig unaufgeklärt. Eine Reihe von Merkmalen nähert sie den Rüsseltieren, weshalb sie denselben hier angereiht werden. Wichtigste Gattung †Pyrotherium (Fig 86) (Untermiozän Argentiniens). Die ersten Pyrotherien im Eozän Patagoniens (†Carolozittelia).

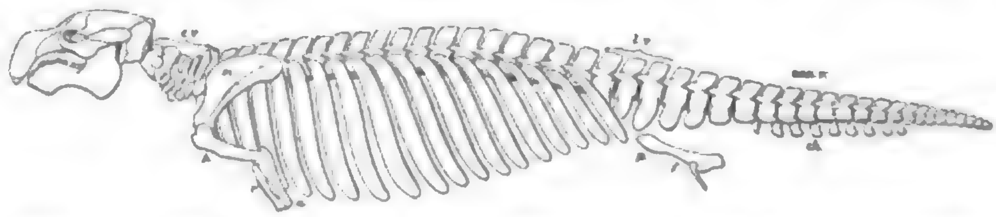


Fig. 85. Skelett von †Halitherium Schinzi. Mitteloligozän von Mainz. $^1/_{25}$ natürlicher Größe. cv Halswirbel, d Brustwirbel, lv Lendenwirbel, cauv Schwanzwirbel, sc Scapula, h Humerus, r Radius, u Ulna, p Becken, f Femur, ch Haemapophysen. Aus dem Guide to the Foss. Mamm. and Birds Brit. Mus. Nat. Hist. London 1909.

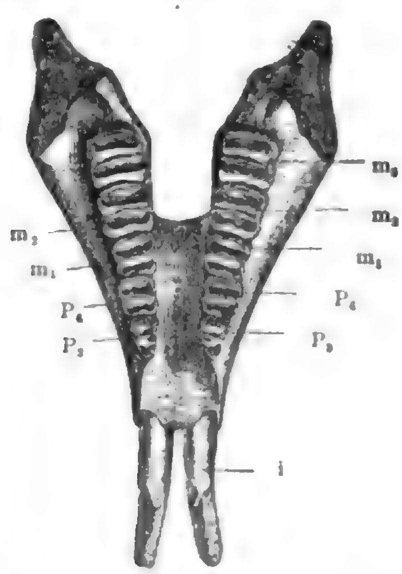


Fig. 86. Unterkiefer von †Pyrotherium Sorondoi, Miozän Patagoniens. In $^1/_{12}$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

†XVII. Ordnung: Notoungulata.

Ausschließlich in Südamerika; in der Eiszeit erloschen. Gebiß meist vollständig, häufig die Schneidezähne (I_1) zu Stoßzähnen vergrößert, die folgenden Zähne ohne scharfe Gegensätze ineinander übergehend. Zähne bei den ältesten Gattungen brachyodont, bei den jüngsten hypsodont. Molaren lophodont (langer Ectoloph, sehr schräger Protoloph, kurzer, gerader Metaloph). Im Habitus zwischen Klippschliefern und Nagern die Mitte haltend; mit den Nagern aber nicht verwandt (I_1 der Notoungulaten sagittal komprimiert und nicht mediolateral wie bei den Nagern). Ebenso nicht mit den Hyracoidea verwandt, da diese ursprünglich bunodonte Molaren besaßen, die Notoungulata aber von Ahnen mit trituberkulären bezw. tuberkulärsektioralen M abstammen.

In die Täler der oberen Molaren wachsen von den Jochen aus Falten hinein, welche die gleiche Funktion wie Crista, Crochet und Antecrochet der Nashornmolaren besaßen; mitunter entwickelt sich an dem Hinterende der Krone noch ein drittes Querjoch aus einem besonderen Pfeiler. Die unteren M sind aus zwei halbmondförmigen Falten aufgebaut, von denen die vordere mit einem Innenhöcker in Verbindung tritt. Auch auf der Innenseite des hinteren Halbmondes der unteren M entwickelt sich ein Pfeiler, der oben meistens isoliert bleibt.

Die Gliedmaßen sind verschieden spezialisiert; ihr Bau weist auf Abstammung von primitiven Raubtieren hin (nicht von †Protungulaten und nicht von jüngeren Ungulaten).

Die Systematik ist noch nicht ganz geklärt. Wir sehen heute nur, daß sich im Kreise der Notoungulaten vier Stämme unterscheiden lassen, die in einer gemeinsamen Wurzel zusammenlaufen: Typotheria, Toxodontia, Entelonychia, Astrapotherioidea.

†1. Subordnung: Typotheria.

Nur in Südamerika vom Eozän bis zum Plistozän. Im Habitus und namentlich im Vordergebiß ähneln sie den Nagern und Klippschliefern.

sind aber mit ihnen nicht verwandt und stellen einen ganz selbständig entwickelten Stamm dar. Das Gebiß ist fast immer vollständig; die ersten I stark vergrößert, I_2 und I_3 sowie C verkleinert, meist von I_2 ab die folgenden Zähne ohne scharfe Gegensätze ineinander übergehend. Backenzähne ursprünglich oben lophodont, unten selenolophodont, ursprünglich brachyodont, bei den spezialisierten, üngsten Gattungen hypsodont.

Im Schädel ist das auffallendste Merkmal die starke Auftreibung der Squamoso-Mastoidregion; es entsteht eine Kapsel, die entweder hohl oder mit Luftzellen erfüllt ist, mit der Bulla kommuniziert und den nach oben gerichteten äußeren Gehörgang umschließt.

Der Bau der Molaren ist in mancher Hinsicht eigentümlich. Die oberen Backenzähne sind bei den hypsodonten Gattungen nach innen, die unteren nach außen gebogen; die M bestehen aus zwei Hälften, die gleichgroß sind, während die hintere Hälfte der P kleiner ist.

†1. Familie: Notopithecidae.

Stammgruppe der †Interatheriidae und †Hegetotheriidae; nur im Eozän und Oligozän Patagoniens. Gebiß vollständig brachyodont, I noch nicht differenziert; untere I und C meißelförmig, obere I, C und P^1 schneidend. Die kleinen Tiere hatten die Größe eines Hasen.

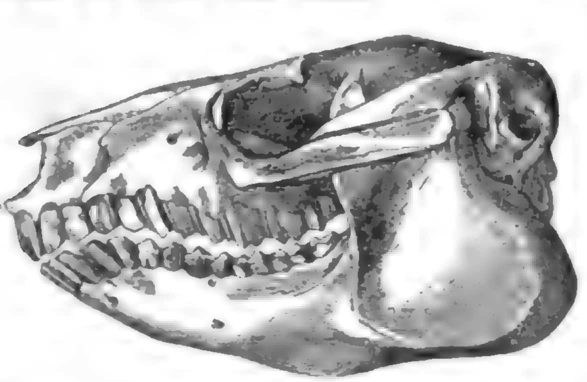


Fig. 87. †Protypotherium australe, Miozän (Santa-Cruz-Schichten) Patagoniens. $^{3}/_{5}$ natürlicher Größe. Nach W. J. Sinclair.

†2. Familie: Interatheriidae.

Gebiß vollständig; I_1 mit Wurzel, alle übrigen Zähne prismatisch. P_3 und P_4 einfach gebaut. Tibia und Fibula frei.

†Protypotherium. Miozän Patagoniens (Santa Cruz Beds. Fig. 87).

†Interatherium. Ebenda. Seitliche I und C schwächer.

†3. Familie: Hegetotheriidae.

Gebiß vollständig. I_1 oben stark vergrößert, schaufelartig, nach innen gebogen. Im Unterkiefer I_1 und I_2 vergrößert, meißelförmig. P_3 und P_4 wie M gebaut. Tibia und Fibula verwachsen.

†Hegetotherium. Oligozän und Miozän Patagoniens. Schwanz lang, Größe eines Fuchses.

†Pachyrukhos. Zuerst im Oligozän Patagoniens, im Plistozän erlöschend.

†4. Familie: Typotheriidae.

Außer den †Typotheriiden wurden von Ameghino noch die Familien der †Archaeopithecidae, †Henricoosborniidae, †Pantostylopidae, †Archaeohyracidae und †Acoelodidae unterschieden. Die ersten drei sind jedenfalls synonym. Die †Archaeohyracidae sind wohl zweifellos die Ahnen von †Typotherium und somit ist es unrichtig, sie von den †Typotheriidae zu trennen; die †Archaeopitheciden sind die Ahnen der †Archaeohyraciden. Ich ziehe mit Ausnahme der †Acoelodidae [Ahnen der †Notohippidae] alle genannten Familien in den †Typotheriidae zusammen.

Ursprünglich (im Eozän Patagoniens) hatten die kleinen Gattungen †Henricoosbornia, †Archaeopithecus, †Pantostylops, †Othnielmarshia usw. ein vollständiges Gebiß; P waren einfacher als M, obere P dreieckig. Alle Backenzähne waren brachyodont. Die Tierchen hatten die Größe von Kaninchen.

Aus diesen Formen gingen im Oligozän Formen wie †Archaeohyrax hervor (auch im Miozän Patagoniens nachgewiesen). Der Schädel nähert sich in der Form der Gattung †Hegeto-

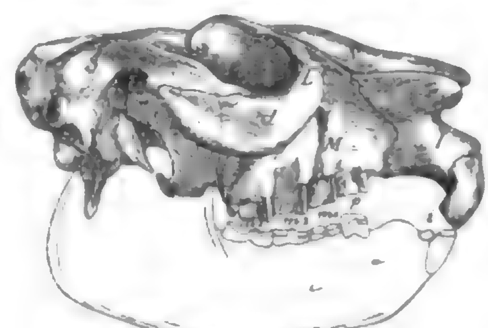


Fig. 88. †Schädel von Typotherium cristatum aus dem Plistozän Patagoniens. $^{1}/_{10}$ natürlicher Größe. Nach P. Gervais.



Fig. 89. Kauflächen verschiedener Notoungulatenmolaren. a †Typotherium (rechts oben M^2), b †Toxodon platense (rechts oben M^3), c †Nesodon imbricatum (rechts oben letzter Milchmolar). Fig. a in natürlicher Größe, b und c in ½ natürlicher Größe. Nach R. Lydekker.

therium, doch ist der Unterkiefer schlanker. Aus †Archaeohyrax entstand †Typotherium, (Fig. 88, 89a), das im älteren Plistozän Pata-

goniens häufig war. Bei den jüngsten †Typotheriiden fehlen I^1 und I^2 sowie I_3; oben und unten fehlen die C und auch der Prämolarenabschnitt weist starke Rückbildung auf, da oben nur mehr P^3 und P^4, unten nur mehr P_4 erhalten sind. Die Backenzähne besitzen Zementlagen in der Krone und sind prismatisch.

†2. Subordnung: Toxodontia.

Nur in Südamerika vom Oligozän bis zum Plistozän. Vordergebiß stark spezialisiert; wenn der obere I^2 kräftiger entwickelt ist, betrifft die Vergrößerung den unteren I_3. Im Prämolarenabschnitt gehen bei den spezialisierten Formen die beiden vorderen P verloren; P_3 und P_4 werden molariform. Ursprünglich brachyodont, werden die Backenzähne der jüngeren Gattungen prismatisch; der Schmelzbelag verschwindet entweder auf der Innenseite der Backenzähne oder er geht auf der Vorderseite und Hinterseite verloren. Hand in Hand mit dieser eigenartigen Spezialisation geht die Ausbildung eines Zementbelages, der die Krone teilweise oder ganz umkleidet. Bei prismatischen Backenzähnen ist die Achse stark gekrümmt. M_3 ist bei spezialisierten Formen sehr lang.

Im Skelett teils sehr primitive Merkmale, teils hochgradige Spezialisationen. Der allgemeine Habitus ist nashornartig.

Den Ausgangsstamm der hochgradig spezialisierten †Nesodontidae bilden wahrscheinlich die

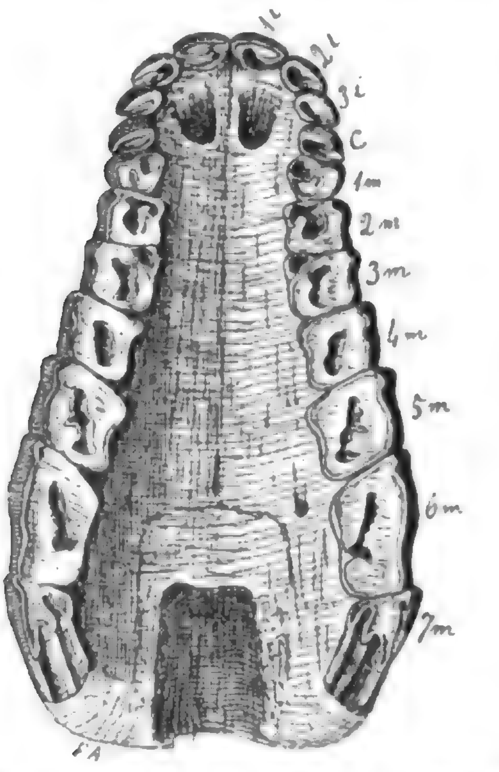


Fig. 90. Oberes Gebiß von †Morphippus imbricatus aus dem Miozän Patagoniens. Ungefähr in $^3/_5$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

†Acoelodidae, die sich in den wesentlichen Merkmalen an die †Archaeopithecidae anschließen, so daß also die †Notopithecidae, †Archaeopithecidae und †Acoelodidae nach einer gemeinsamen Wurzel konvergieren und die Herkunft der †Typotheria und †Toxodontia aus einer gemeinsamen Ahnengruppe höchst wahrscheinlich machen. †Acoelodus (patagonisches Eozän).

Bei der 2. †Familie: Notohippidae aus dem Oligozän und Miozän Patagoniens sind die unteren I meißelförmig, die oberen schaufelartig, aber nicht vergrößert. Vom I_1 bis zum M_3 gehen die Zähne ohne Gegensätze ineinander über. P und M sind noch allseitig mit Schmelz bedeckt.

†Morphippus (Fig. 90) aus dem Miozän Patagoniens. †Notohippus, †Rhynchippus usf. aus denselben Schichten.

Die 3. †Familie: Nesodontidae, vertreten durch die hochgradig spezialisierte Gattung †Nesodon aus dem Miozän Patagoniens hat ein sehr merkwürdiges Vordergebiß (oberer I^2 schleift auf dem fast horizontal gerichteten unteren I_3). Obere M und P prismatisch, stark gekrümmt, Innenenden der Querjoche miteinander verschmelzend und eine Insel umschließend; obere M nur vorn und außen, die unteren M nur außen und innen mit Schmelz belegt. Zähne erst im Alter bewurzelt. Der Hinterfuß war sekundär plantigrad.

†Nesodon (Fig. 89, c und 91) und †Adinotherium sind die wichtigsten Gattungen (Miozän).



Fig. 91. Schädel von †Nesodon imbricatum aus dem Miozän Patagoniens. $^1/_6$ natürlicher Größe. Nach K. A. von Zittel.

Die 4. †Familie: Toxodontidae ist durch das gewaltige †Toxodon (Fig. 89b) aus der Pampasformation vertreten; es war größer als die größten bekannten Nashörner. Der Schädel erreichte eine Länge von 70 cm. Zwischenkiefer mit medianer Protuberanz vor der Nasenöffnung.

†Toxodontherium im Pliozän und Plistozän Argentiniens.

†3. Subordnung: Entelonychia.

Nur im südamerikanischen Tertiär. Die Entelonychia waren ziemlich große Tiere und erreichten Nashorngröße. Die Endphalangen waren retraktil (wie bei †Chalicotheriidae unter den Perissodaktylen). In der Bezahnung schließen sie sich den Toxodontia an; sie sind jedenfalls aus derselben Wurzel wie diese ent-

sprossen. Die Backenzähne sind bei allen Formen brachyodont geblieben. Die Hand war schlank, der Fuß plump gebaut.

†1. Familie: Notostylopidae. Gebiß spezialisiert: I^{1} und I_{1} vergrößert, I_{2} und I_{3}, mitunter auch C fehlend, obere I^{2}, I^{3} und C reduziert. Hinterhaupt mit aufgetriebener Mastoidregion. Auf das Eozän Patagoniens beschränkt (†Notostylops, †Catastylops usw.).

†2. Familie: Isotemnidae. Gebiß vollständig. Oberer C mitunter vergrößert. In den Backenzähnen tritt Komplikation durch Spornbildung von den Jochen aus ein. Vom Eozän (†Isotemnus) bis zum Untermiozän Patagoniens (†Pleurocoelodon).

†3. Familie Leontiniidae. Zwischenkiefer vor der Nasenöffnung stark aufgetrieben, Nasenöffnung tief ausgeschnitten. Oberer I^{2} und unterer I_{3} groß, die folgenden Zähne ineinander ohne scharfe Unterschiede übergehend. Endphalangen als breite Hufe ausgebildet. †Leontinia (Fig. 92) (Untermiozän Patagoniens).

†4. Familie: Homalodontotheriidae. Gebiß vollständig; statt der $\frac{I^{2}}{I_{3}}$ die Eckzähne verstärkt. Alle übrigen Zähne brachyodont, in geschlossener Reihe. M einfacher gebaut als bei Isotemnidae. Hand schlank, fünffingerig, retraktile Krallen. Hinterfuß mit sehr kurzen Metapodien. Wichtigste Gattung: † Homalodontotherium (Miozän Patagoniens) (Fig. 93).

†4. Subordnung: Astrapotherioidea.

Die †Astrapotherioidea schließen sich an die †Entelonychia enge an und stammen von derselben Wurzel ab wie diese. Die Spezialisation des Gebisses ist jedoch in eigenartiger Richtung verlaufen, da die Eckzähne als mächtige Hauer entwickelt und die M rhinozerosähnlich sind. Die Squamoso-Mastoidalregion ist nicht aufgetrieben. Das Gebiß bleibt brachyodont; P und teilweise auch unterer I_{3} reduziert. (Bei den †Trigonostylopidae, die im Oligozän ohne Nachkommen erlöschen, fehlt der I_{3}, dagegen bei den †Astrapotheriiden die vorderen P, die bis auf den oberen P^{3} und P^{4} und den unteren P_{4} bei einigen Gattungen verloren gehen (†Astrapotherium aus dem Miozän.) Die †Albertogaudryiden sind als die Vorfahren der †Astrapotheriiden zu betrachten. Die Unterordnung beginnt im Eozän und erlischt im Miozän.

†1. Familie: Trigonostylopidae (Eozän bis Oligozän), z. B. †Trigonostylops, Eozän.

†2. Familie: Albertogaudryidae (Eozän). Die Tiere erreichten Tapirgröße (z. B. †Albertogaudrya).

†3. Familie: Astrapotheriidae (Eozän bis Miozän), z. B. † Proplanodus (Eozän), † Astraponotus (Oligozän), †Astrapotherium (Miozän).

†VIII. Ordnung: Litopterna.

Ebenso wie die †Notoungulata sind auch die †Litopterna eine auf †Südamerika beschränkte

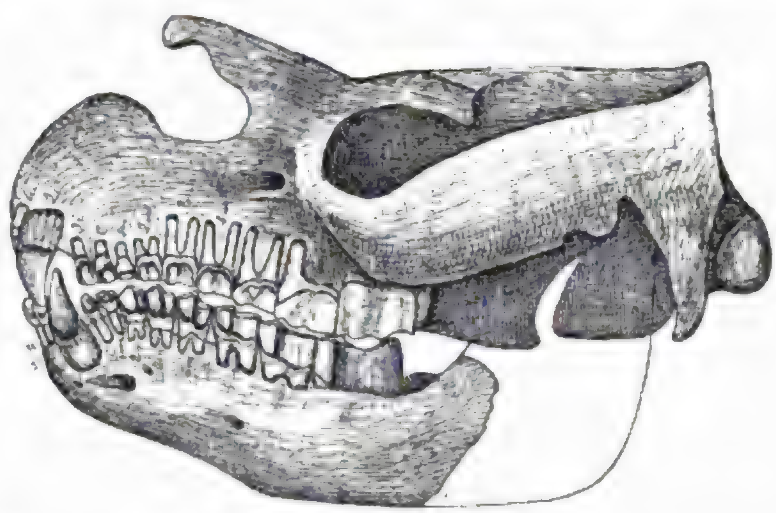


Fig. 92. Schädel von †Leontinia Gaudryi. Untermiozän Patagoniens. In $^{1}/_{8}$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

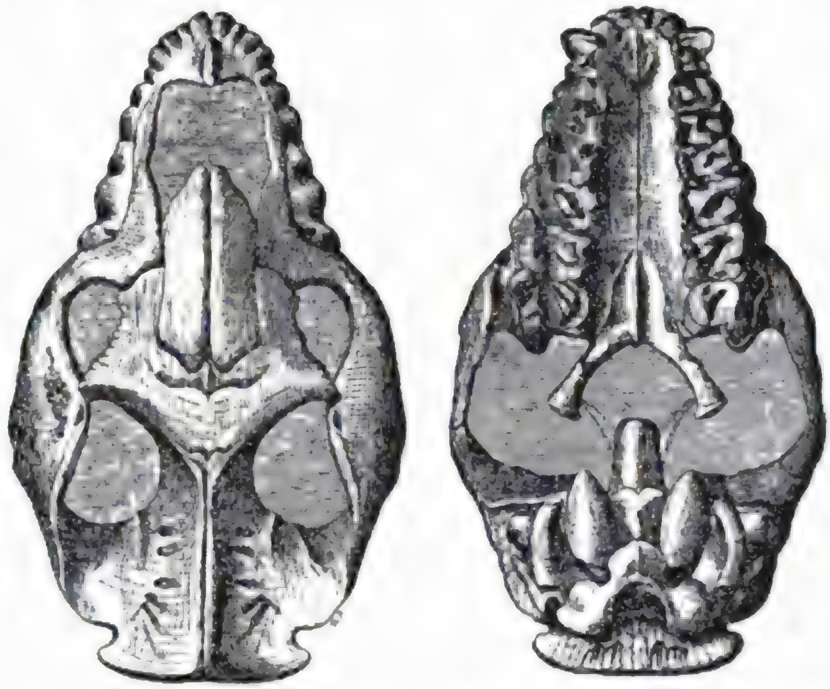


Fig. 93. Schädel von †Homalodontotherium Segoviae aus dem Miozän Patagoniens von oben und unten. In $^{1}/_{8}$ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

Ordnung der Ungulaten, die sich wahrscheinlich aus bunodonten Protungulaten entwickelt hat, die zu den ersten aus Nordamerika eingewanderten alteozänen Ansiedlern in Südamerika gehörten. Die ältesten Gattungen, welche die Ahnenformen der jüngeren †Litopterna darstellen, sind von den †Phenacodontidae kaum zu unterscheiden, doch sind die Eckzähne kleiner und die Zahnlücken größer. Leider sind es fast nur isolierte Molaren, welche die Grundlage der zahlreichen von Ameghino aufgestellten Gattungen und Arten bilden, die in der †Familie der Bunolitopternidae (vgl. oben) den Protungulaten anzureihen sind.

†1. Familie: Macraucheniidae.

Vom Eozän bis zum Plistozän Patagoniens. Das auffallendste Merkmal sind die weit nach hinten verschobenen Nasenlöcher; die Nasalia sind rudimentär. Vielleicht hatte †Macrauchenia einen Rüssel. Die †Macrauchenien dürften aquatile Tiere gewesen sein. Der Vorder- und Hinterfuß war plump und dreizehig.

†Macrauchenia, Plistozän Argentiniens.

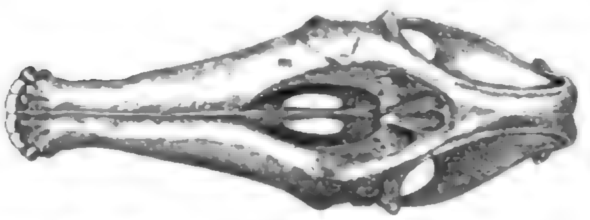


Fig. 94. Schädel von †Macrauchenia patagonica, von oben gesehen. 1/8 natürlicher Größe. Nach Bravard.

†2. Familie: Proterotheriidae.

Im Gegensatz zu den einseitig spezialisierten †Macraucheniidae sind die Nasenbeine lang und die Nasenöffnung vorn gelegen. Die oberen M erinnern an Perissodactylenmolaren, ebenso die unteren, die aus zwei Halbmonden bestehen. Seitenzehen rudimentär, die jüngsten Formen funktionell monodactyl mit kümmerlichen Rudimenten der Seitenzehen; die Spezialisation der Gliedmaßen ähnlich wie bei den Equiden. Metapodien mit Laufkielen. Die ersten †Proterotheriidae erscheinen im Untermiozän. Wichtigste Gattungen: †Diadiaphorus (Miozän und Pliozän), †Proterotherium (Miozän), †Theosodon (Fig. 95) †Thoatherium (Miozän) (Fig. 95).

†3. Familie: Adiantidae.

Systematische Stellung unsicher. Von †Adiantus und †Proadiantus nur Unterkiefer bekannt; Zahnreihe geschlossen, M im großen und ganzen proterotheriidenartig.

XIX. Ordnung: Perissodactyla (Unpaarhufer).

Die Perissodaktylen, heute nur mehr in Equus, Rhinoceros und Tapirus lebend, standen im Tertiär in hoher Blüte. Bei allen Stämmen sind die Gliedmaßen durch das Ueberwiegen der Mittelzehe über die seitlichen ausgezeichnet; diese Spezialisierung führt bei den Equiden zu einer Monodaktylie.

Die Equiden und Tapiriden trugen niemals knöcherne Schädelprotuberanzen; dagegen sind bei den †Titanotheriiden und Rhinocerotiden Schädelzapfen zur Ausbildung gelangt, die mitunter enorme Dimensionen erreichen. Bei lebenden Pferden treten dann und wann als Abnormitäten knöcherne Schädelzapfen auf.

Das Gebiß der Perissodaktylen ist ursprünglich vollständig gewesen und hat nur in einzelnen Stämmen eine geringe Reduktion erfahren, am meisten noch bei den Rhinocerotiden, wobei einzelnen Formen (z. B. †Diceros und Coelodonta) alle I und C sowie der untere $P_{\overline{1}}$ verloren gegangen sind. Im Eozän sind die Gebisse noch in allen Unpaarhuferstämmen vollständig. Ursprünglich ausnahmslos brachyodont, werden die Backenzähne im Laufe der Stammesgeschichte (z. B. Equus, Rhinoceros, †Diceros, Coelodonta) prismatisch, auch entwickelt sich Zement in den Vertiefungen der Zahnkronen. Der Uebergang von weicher zu harter Pflanzennahrung führt frühzeitig zu einer Komplikation der Backenzahnkronen, wobei die Joche (Ectoloph, Protoloph, Metaloph) sekundäre Schmelzfalten gegen das Mitteltal der Krone entsenden (Crista, Crochet, Antecrochet). Außerdem wird die Außenwand durch Sekundärpfeiler (Mesostyl, Parastyl, Metastyl) verstärkt (Fig. 104).

Im Carpus treten keine Verwachsungen ein. Das Femur besitzt einen dritten Trochanter. Typisch unguligrad, Hinterfuß stets höher spezialisiert als der Vorderfuß.

Den vier Familien der Perissodaktylen (Tapiridae, Rhinocerotidae, Equidae und †Titanotheriidae) wird von manchen Autoren noch die Familie †Chalicotheriidae angereiht. Obwohl diese in der Tat in den meisten Merkmalen mit den Perissodaktylen übereinstimmt, muß sie

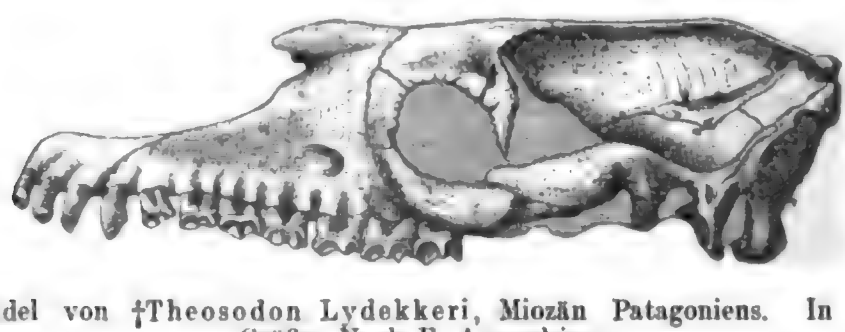


Fig. 95. Schädel von †Theosodon Lydekkeri, Miozän Patagoniens. In 2/3 natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

doch aus phylogenetischen Gründen abgetrennt werden, da die Perissodaktylen aus den Phenacodontiden, die †Chalicotheriidae aber aus den †Meniscotheriidae hervorgegangen sind. Wir müßten konsequenterweise auch die †Litopterna mit den Perissodactyla vereinigen, wenn wir die †Chalicotheriidae den Perissodaktylen anschließen. Die Perissodaktylen stammen entweder von Tetraclaenodon selbst oder von einer sehr nahestehenden Phenacodontidengattung ab.

1. Familie: Tapiridae (Tapire).

Heute auf das tropische Amerika und Südasien beschränkt, lebten die Tapire im Tertiär vom Eozän bis zum Pliozän in Europa, vom Eozän bis zum Plistozän in Nordamerika und im Plistozän außer ihrer heutigen Heimat auch noch in China.

†1. Subfamilie: Lophiodontinae.

Obere M die Mitte zwischen dem Typus der Tapirinae und der Rhinocerotidae haltend. Die beiden Querjoche der unteren M stehen schief zur Längsachse der Krone. Metacon in der Regel konkav. Nur im Eozän; häufig in Europa, sehr selten in Nordamerika (†Heptodon, †Helaletes).



Fig. 96. Linker Hinterfuß von Thoatherium crepidatum, aus dem Miozän Patagoniens. ½ natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

†Chasmotherium. Oben und unten 4 P. Unterer M_3 mit zwei Jochen. Mitteleozän Europas.

†Lophiodon. Oben und unten 3 P (vorderster fehlt). Unterer M_3 mit drei Jochen. Eozän Europas (Fig. 97).

2. Subfamilie: Tapirinae.

Obere M mit stark konvexen Außenhöckern (Paracon und Metacon). Untere M mit zwei senkrecht zur Zahnachse stehenden Jochen. Fossil in Nordamerika vom Eozän bis Plistozän, in Europa vom Oligozän bis Pliozän, in Asien und Südamerika erst vom Plistozän an.

†Systemodon im Untereozän von Wyoming.

†Isectolophus. Obereozän.

†Protapirus (Fig. 97) im Oligozän von Europa und Nordamerika, hier auch noch im Miozän. Die ersten echten Tapire erscheinen im Obermiozän Steiermarks und werden im Unterpliozän häufiger, fehlen aber den Steppenfaunen Griechenlands, Kleinasiens usf. Im Plistozän Südchinas der riesige †Tapirus sinensis.

2. Familie: Rhinocerotidae (Nashörner).

Nasenbeine bei den spezialisierten Typen mit knöchernen Protuberanzen; in der Regel sind diese median gestellt, selten symmetrisch (†Diceratherium). Backenzähne der ältesten Gattungen einfach gebaut, später immer mehr kompliziert, zuerst brachyodont, bei den jüngsten Gattungen hypsodont. Untere M mit zwei fast rechtwinklig abgeknickten Jochen. Während die oberen M durch ihre stufenweise erfolgende

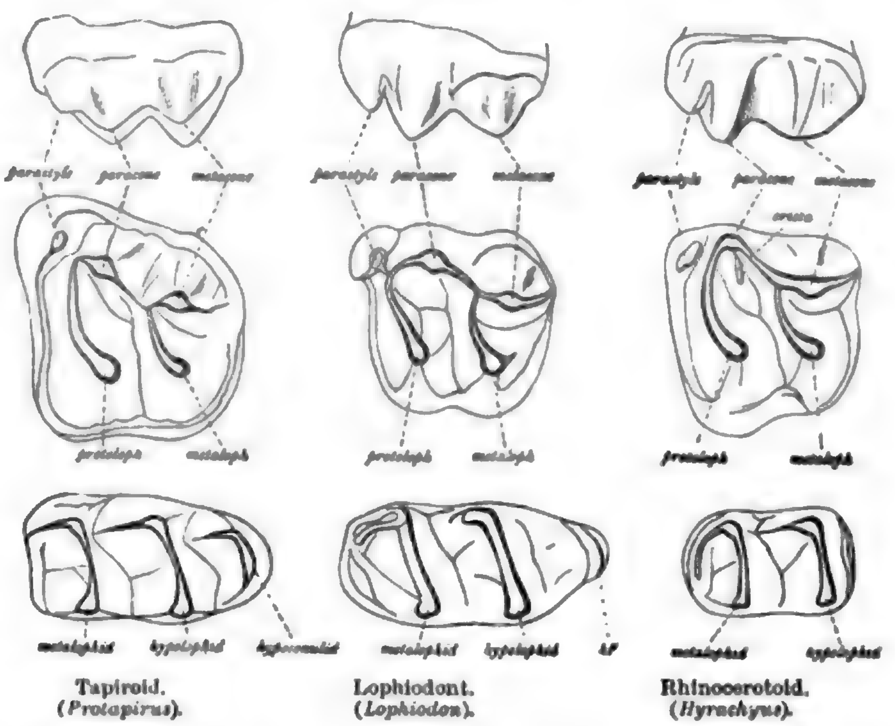


Fig. 97. Vergleich der Molarentypen dreier Perissodaktylenstämme: links echte Tapire, in der Mitte Lophiodontinen, rechts Rhinocerotiden. Obere Reihe: Seitenansicht eines oberen M; mittlere Reihe: Kaufläche eines oberen M; untere Reihe: Kaufläche eines unteren M. Nach H. F. Osborn.

Spezialisation ein gutes Unterscheidungsmerkmal abgeben, sind die unteren M in ihren Formen außerordentlich konstant und schwer zu unterscheiden, so daß Unterkiefer und isolierte untere Rhinocerotidenmolaren sehr schwer bestimmbar sind.

†1. Subfamilie: Hyracodontidae.

Schädel hornlos, Gebiß vollständig. Eckzähne schwach, dicht an die I anschließend, vom P_1 durch Lücke getrennt. Bau der M einfach. Gliedmaßen lang und schlank. Die hochbeinigen, zarten Tiere ähneln sehr den ältesten Equiden und waren wie diese wohl schnelllaufende Tiere. Nur im Obereozän und Oligozän Nordamerikas.



Fig. 98. Schädel von †Hyracodon nebrascense aus dem Oligozän (White River) Nordamerikas. $^1/_8$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

†Hyrachyus (Fig. 97.): Obereozän von Wyoming; †Hyracodon (Fig. 98): Oligozän Nordamerikas.

†2. Subfamilie: Amynodontinae.

Schädel merkwürdig plump, bärenähnlich, Schnauzenende breit. Nasalia hornlos, kurz. C hauerartig, die beiden letzteren oberen M sehr groß, ohne sekundäre Sporne. Gliedmaßen plump. Die Tiere dürften eine aquatische Lebensweise geführt haben. Sie erscheinen zuerst im Obereozän Nordamerikas, kommen im Oligozän nach Europa und sterben hier und in Amerika noch in dieser Zeit aus.

†Metamynodon (Fig. 99). Oligozän Nordamerikas.

†Cadurcotherium. Oligozän Europas.

3. Subfamilie: Rhinocerinae.

Schädel bei den älteren Gattungen hornlos, bei den jüngeren mit Protuberanzen auf den Nasenbeinen; bei Coelodonta (z. B. †Coelodonta antiquitatis Blumenbach = Rhinoceros tichorhinus Fisch. et auct.) werden die Nasenbeine durch ein starkes, knöchernes Septum gestützt. Unterer C schon bei den ältesten Gattungen fehlend, später auch der obere C verschwindend. Obere M schrittweise durch Ausbildung von Sekundärfalten spezialisiert; die P folgen, indem bei den amerikanischen †Aceratheriumarten zuerst der $P^{\underline{2}}$, dann $P^{\underline{3}}$ und zuletzt $P^{\underline{4}}$ molariform werden, während bei den echten europäischen †Aceratheriumstämmen zuerst der P^4, dann P^3 und zuletzt $P^{\underline{2}}$ molariform werden. Im Unterkiefer wird der $I_{\overline{2}}$ groß und verdrängt den immer kleiner werdenden $I_{\overline{1}}$; der untere $I_{\overline{3}}$ verschwindet schon frühzeitig, der obere erst später. — Hals stets kurz, Körper mehr oder weniger plump und schwerfällig. Hinterfuß seit dem Oligozän dreizehig und in der Entwicklung stehen geblieben, Vorderfuß bei älteren Gattungen vierzehig, bei jüngeren dreizehig (schon bei †Aceratherium, wo aber noch ein stark reduzierter Minimus vorhanden ist). Die Rhinocerinae erscheinen zuerst im Mitteleozän Europas, werden im Oligozän Europas und Nordamerikas häufig und breiten sich im Miozän über Eurasien aus, während sie in Nordamerika zurückgehen. Von da

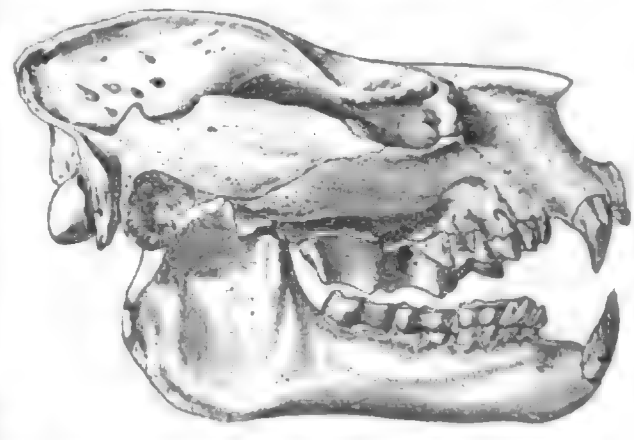


Fig. 99. †Schädel von Metamynodon planifrons aus dem Oligozän (White River) Nordamerikas. Ungefähr $^1/_9$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

an spielt sich die weitere Entwicklung der Nashörner nur in Eurasien und Afrika ab; heute leben sie nur mehr in Südasien und Afrika, während sie in der Eiszeit bis an das nördliche Eismeer streiften. Die von Cuvier

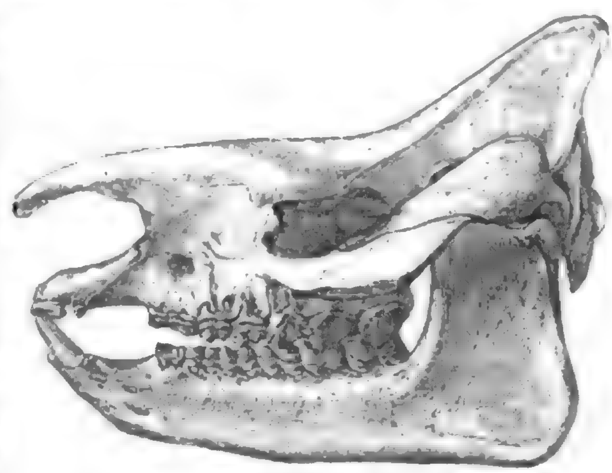


Fig. 100. Schädel von †Aceratherium tridactylum aus dem Oligozän (Protoceras Beds) Nordamerikas. $^1/_8$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

errichtete Gattung Rhinoceros wird heute in zahlreiche selbständige Gattungen zerlegt.

†Prohyracodon. Primitivster Rhinocerine

aus dem Mitteleozän Siebenbürgens. Obere M spornlos.

†Trigonias. Aeltestes Nashorn Nordamerikas aus den oligozänen White River Beds.

†Leptaceratherium. Ebenda.

†Meninatherium. Oberoligozän, Krain.

†Epiaceratherium, †Ronzotherium, †Praeaceratherium und †Protaceratherium sind Nashörner aus dem Oligozän Europas mit stufenweise komplizierten Backenzähnen.

†Aceratherium ist die häufigste mitteltertiäre Nashorngattung und vom Oligozän bis zum Miozän in Nordamerika verbreitet, wo sie erlischt; in Eurasien erreicht diese Gattung eine hohe Blüte im Miozän und Unterpliozän, stirbt aber rasch aus. Ursprünglich hornlos, später schwache Hörner. Obere P stets einfacher als die M gebaut.

†Diceratherium mit zwei kleinen symmetrischen Hornpolstern auf den Nasenbeinen war ein kleines Nashorn, das im Oligozän und Miozän in Europa und Nordamerika lebte.

Diesen Formen reiht sich das hornlose †Brachypotherium an (Miozän und Unterpliozän Europas); in Nordamerika ist sein Nachkomme (?) †Teleoceras im Miozän häufig.

Ceratorhinus, das noch heute auf Sumatra lebt, erscheint zuerst im Miozän Europas. Das südindische Rhinoceros mit hochkronigen Molaren tritt zuerst im Unterpliozän Ostindiens auf; das lebende afrikanische Diceros (Diceros bicornis) hat seine ersten Vertreter im Unterpliozän Europas und Asiens. Die höchstspezialisierte Gattung ist Coelodonta, die in Coelodonta simus noch lebt. Ihr gehören die großen Nashörner der Eiszeit Eurasiens (†Coelodonta Mercki, †Coelodonta antiquitatis) an, die mit dichtem, rotbraunem Fell bekleidet waren.

†4. Subfamilie: Elasmotheriinae.

Von dieser ganz aberranten Unterfamilie der Rhinocerotiden ist bisher nur die einzige Gattung †Elasmotherium bekannt. Unverkennbar ist †Elasmotherium aus dem Stamm der Rhinocerotiden entsprossen, gehört jedoch einem schon im Frühtertiär abgezweigten Ast an, der sich in Asien entwickelt hat. Im Gegensatz zu den echten Nashörnern stand der mächtige Knochensockel, welcher ein riesiges, unpaariges Horn trug, mitten auf der Stirn und zwischen den Augen; auf der Nasenspitze stand ein unpaariges kleines Horn.

Die Schneidezähne und Eckzähne fehlen gänzlich. Die Backenzähne, welche oben und unten außer den drei M nur noch P_4 und P_3 umfassen, sind hochgradig hypsodont; ihr Schmelz ist stark gekräuselt. Von den echten Nashörnern unterscheidet sich †Elasmotherium durch die Abschnürung eines selbständigen Innenpfeilers vom Protoloph (Fig. 101). Ebensoist auch der Verlauf der Joche der unteren M eigentümlich. Das Skelett stimmt im Gesamtbau mit den echten Nashörnern überein. Die Größe übertraf die der Nashörner; der Schädel wurde fast 1 m lang.

†Elasmotherium sibiricum, das für das Vorbild des Einhorns gehalten wurde (in der Tat gaben Funde von Mammutstoßzähnen die Veranlassung zur Sage vom Einhorn), ist an verschiedenen Stellen im Plistozän Südrußlands, am Kaspisee, in Sibirien, sehr selten auch im Rheintal gefunden worden.

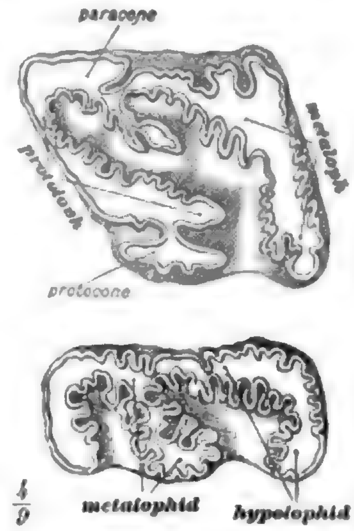


Fig. 101. Oberer und unterer Molar von †Elasmotherium sibiricum aus der Eiszeit Sibiriens. 4/9 natürlicher Größe. Nach A. Gaudry und M. Boule.

3. Familie: Equidae.

Die Equiden, welche zuerst im unteren Eozän Englands mit dem sehr primitiven †Hyracotherium (Fig. 103, 104) auftreten, haben sowohl in Europa als auch in Nordamerika chon im Eozän eine hohe Blüte erreicht. In Europa sind sogar die Equiden während der Eozänzeit viel formenreicher als in Nordamerika; während des Mitteleozäns lebten in Europa sechs Gattungen mit gegen 20 Stammlinien, in Nordamerika nur zwei Gattungen mit etwa sechs Stammlinien. Während jedoch die europäischen Equiden im Obereozän selten werden und im Unteroligozän gänzlich erlöschen, blühen in Nordamerika die Stämme empor und entsenden zweimal Ausläufer nach Europa: einmal im Mittelmiozän mit †Anchitherium, das zweite Mal im Unterpliozän mit †Hipparion, das sich in die lebenden eurasiatischen Wildpferde fortsetzte. In Nordamerika (und seit dem Unterpliozän auch in Südamerika) entwickelten sich die Equiden selbständig weiter, um jedoch im Plistozän in der Neuen Welt gänzlich zu erlöschen.

Noch in jüngster Zeit werden von manchen Autoren (z. B. Max Schlosser 1911) vier „Unterfamilien", und zwar die Hyracotheriinae, Palaeotheriinae, Anchitheriinae und Equinae unterschieden. Die Untersuchungen H. G. Stehlins (1905) haben jedoch in klarer Weise gezeigt, daß eine solche Trennung vom phylogenetischen Standpunkte aus nicht haltbar ist. Zwar enden zahlreiche Seitenstämme des Equidenstammes blind; da aber alle Stämme in den Wurzeln zusammenlaufen, so ist es kaum möglich, die übliche systematische Zergliederung der Equiden nach „Unterfamilien" durchzuführen.

Der Stammvater der Equiden ist in †Hyracotherium (Untereozän Englands, Ypresien-Stufe) zu suchen, der Nachkomme von †Tetraclaenodon (?). In Europa ist aus ihm †Pro-

pachynolophus (Untereozän von Reims), in Nordamerika †Eohippus (Wasatch und Wind River) hervorgegangen.

Im Lutetien (Mitteleozän) Europas finden wir sechs Gattungen von „Palaeohippiden", die sich von †Hyracotherium ableiten lassen:

1. Stamm (über †Propachynolophus): †**Pachynolophus** (endet im Bartonien).

2. Stamm: †**Lophiotherium** (endet im Ludien).

3. Stamm: †**Propalaeotherium** (endet im Bartonien).

4. Stamm: †**Plagiolophus** (endet im Unteroligozän).

5. Stamm: †**Palaeotherium** (endet im Unteroligozän).

6. Stamm: †**Anchilophus** (endet im Ludien).

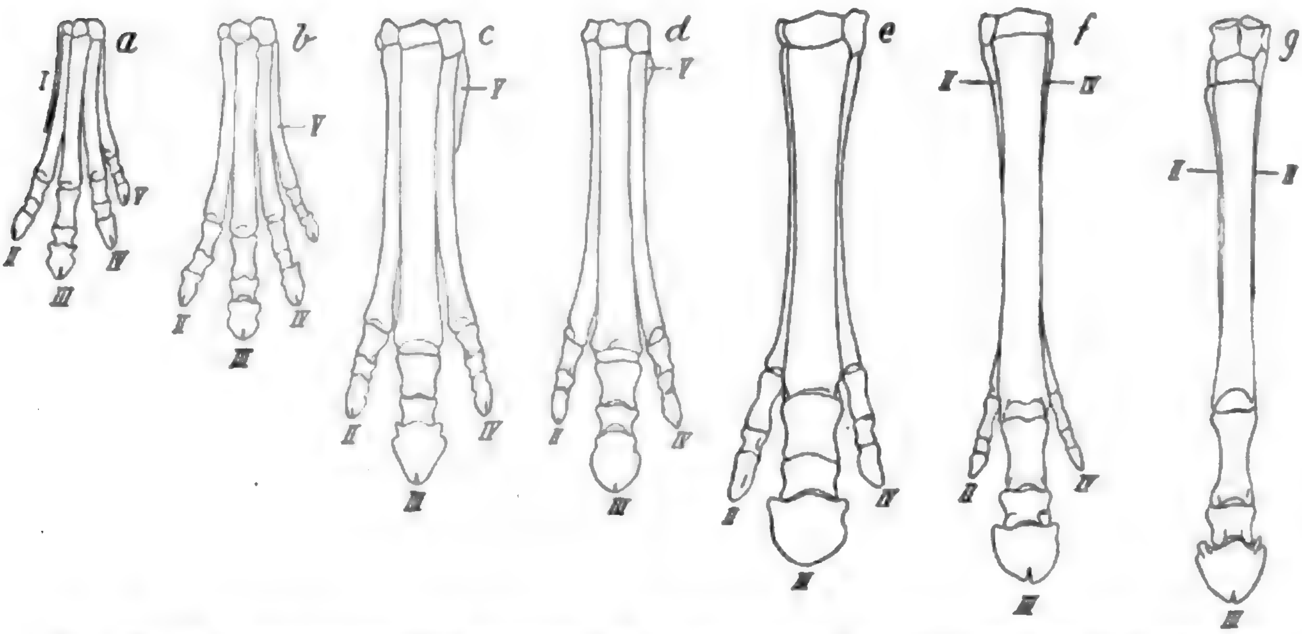


Fig. 102. Die phylogenetische Entwickelung der Pferdehand in den amerikanischen Stämmen. a †Eohippus pernix. — Wasatch. b †Orohippus agilis. — Bridger. c †Mesohippus celer. — White River. d †Miohippus anceps. — John Day. e †Hypohippus equinus. — Deep River. f †Neohipparion Whitneyi. — Arikaree. g †Protohippus pernix. — Arikaree. Zusammengestellt von O. Abel 1912.

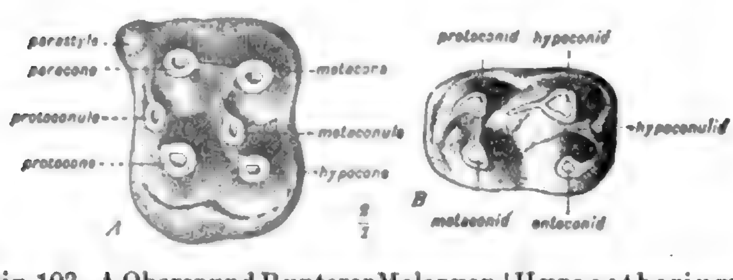


Fig. 103. A Oberer und B unterer Molar von †Hyracotherium leporinum aus dem Yprésien (London Clay) Englands. ²/₁ natürlicher Größe. Nach R. Owen.

In Nordamerika ging (Fig. 102) aus †Eohippus im Wind River †Protorohippus hervor, dem im Bridger †Orohippus, im Uinta †Epihippus und im Unteroligozän †Mesohippus folgen. Aus Mesohippus ging †Anchitherium hervor, das in Nordamerika im Untermiozän erscheint, in Europa zuerst im Mittelmiozän auftritt und schon im Unterpliozän erloschen ist, während in China noch im Unterpliozän eine große Art lebte.

Ebenso wie †Anchitherium ist auch der Stamm †Hypohippus (Mittelmiozän bis Unterpliozän Nordamerikas) aus †Mesohippus hervorgegangen, ohne zu einer equusartigen Gattung zu führen. Hingegen hat sich ein dritter, aus †Mesohippus über †Miohippus hervorgegangener Stamm, †Parahippus (Untermiozän Nordamerikas), weiterentwickelt, und zwar zu †Meryhippus (Mittelmiozän bis Unterpliozän Nordamerikas, Fig. 105). Hier ist bereits eine wesentliche Annäherung an den Gebißtypus der jüngeren Equiden zu verzeichnen; die Equusähnlichkeit steigert sich bei †Protohippus (Unterpliozän Nordamerikas), den Stammvater der sich nunmehr trennenden amerikanischen und europäischen Stämme. Die europäischen beginnen mit dem Einwanderer †Hipparion, der im Unterpliozän ganz Eurasien überflutet (die Einwanderung nach Europa erfolgte sicher über Ostasien), der sich in die oberpliozänen Arten der lebenden Gattung Equus fortsetzt. In Nordamerika entstand aus †Protohippus der blind endende Stamm der †Neohipparionarten (Unterpliozän Nordamerikas) sowie der gleichalterige †Pliohippusstamm. Neuerlich trennen sich zwei Stämme: ein Zweig der nordamerikanischen Equiden wandert nach Trockenlegung der Ver-

bindungsbrücke mit Südamerika dorthin aus und erlischt mit †Hippidium und †Onohippidium im Plistozän Südamerikas. Der andere Stamm bleibt in Nordamerika und entwickelt sich aus †Pliohippus zu einer Gattung, die zwar sehr equusähnlich ist, aber wegen der verschiedenen Herkunft als †Neohippus nov. gen. zu bezeichnen ist. †Neohippus erlischt im Plistozän Nordamerikas ohne Nachkommen.

Die Phylogenie der Pferdestämme ist somit die auf S. 754b bis 755 dargestellte.

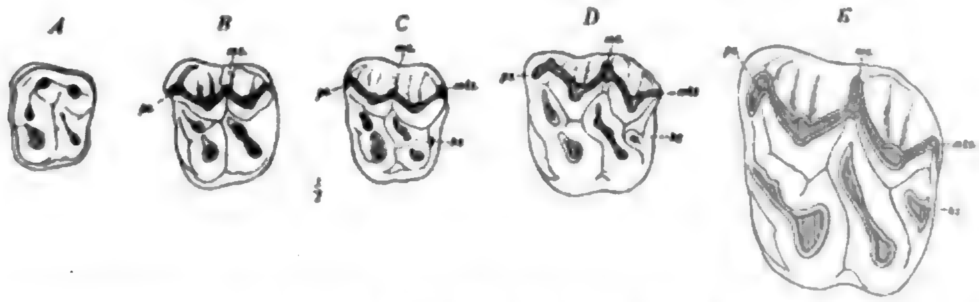


Fig. 104. Verschiedene Typen oberer Molaren von tertiären Equiden. (Stufenreihe, aber keine Ahnenreihe.) A. Hyracotherium, B †Pachynolophus, C Anchilophus, D Mesohippus, E †Anchitherium. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn.

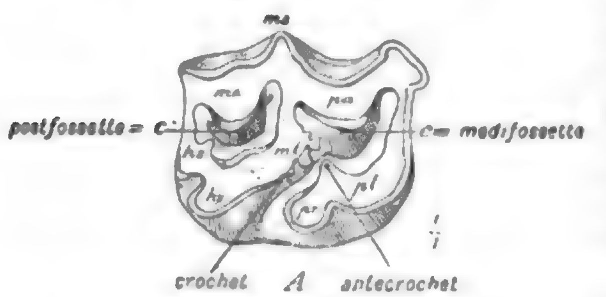


Fig. 105. Oberer Milchmolar von †Meryhippus aus dem Obermiozän Nordamerikas. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn.

Die Reduktion der Seitenzehen läßt sich namentlich bei den echten Pferden Schritt für Schritt verfolgen. Die beistehende Abbildung (Fig. 102) zeigt die stufenweise Reduktion der Seitenzehen und den frühzeitigen Verlust des Daumens, dem erst später der fünfte Finger folgt.

Unter den erloschenen Equiden aus dem Eozän Europas begegnen wir in †Palaeotherium, das zuerst von Cuvier aus dem Pariser Gips beschrieben wurde, plumpen, tapirähnlichen Tieren, während andere Stämme wie †Plagiolophus schlankfüßige, leicht gebaute Tiere waren, bei denen die Seitenzehen bereits einen hohen Reduktionsgrad erreicht hatten.

†4. Familie: Titanotheriidae.

Diese Perissodaktylenfamilie erscheint im Eozän Nordamerikas und erlischt im Oligozän. In Europa sind nur sehr seltene Reste von †Titanotheriiden nachgewiesen (†Brachydiastematherium transsylvanicum aus dem Mitteleozän Siebenbürgens; †Menodus? rumelicus aus dem Alttertiär Rumäniens). Die Tiere erreichten gewaltige Körpergröße; die am höchsten spezialisierten Gattungen standen an Größe den Elefanten gleich. Das obere Gebiß ist typisch bunoselenodont, das untere lophodont; ihre Nahrung dürfte ausschließlich aus saftigen, weichen Pflanzen bestanden haben, da die breitkronigen, sehr niederen Zähne nicht für das Zerreiben harter, trockener Pflanzen geeignet waren. Ursprünglich hornlos, erhält der Schädel im Laufe der Stammesgeschichte mächtige Zapfen, die paarig angeordnet waren und vom hinteren Ende der Nasenbeine sehr schräg nach vorn vorsprangen. Die Protuberanzen sind bei den Weibchen kleiner. Die Gliedmaßen waren bei den jüngsten Gattungen elefantenartig; die Hand war vierzehig, der Fuß dreizehig, also ähnlich wie bei den Tapiren. Osborn hat verschiedene geschlossene Stammesreihen nachweisen können. Es werden zwei Unterfamilien unterschieden, die primitiveren †Palaeosyopinae und die spezialisierteren †Titanotheriinae.

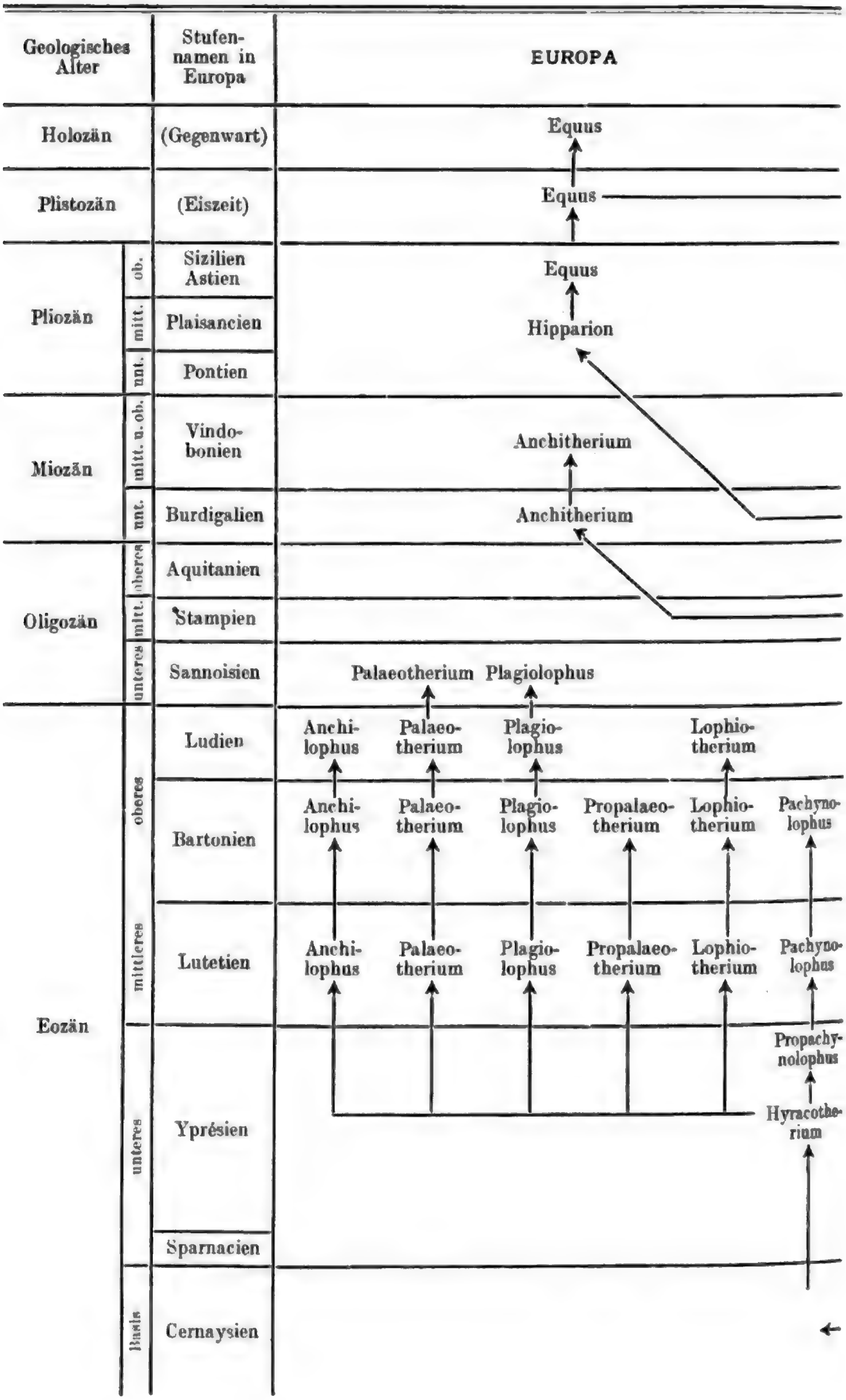
Unter den †Palaesyopinae, den Vorläufern der †Titanotheriinae, ist †Lambdotherium aus dem Untereozän (Wind River) von Wyoming deshalb wichtig, weil es das Bindeglied zwischen den †Titanotheriiden und primitiveren Perissodaktylen bildet. Es schließt sich ebenso wie z. B. †Hyracotherium enge an die Protungulata an, die ja nur durch eine künstliche und willkürlich gezogene Grenze von den jüngeren Ungulatenstämmen getrennt sind. Die Gliedmaßen waren hoch und schlank und ähnelten †Eohippus. †Palaeosyops, mit vollständigem Gebiß, war im Untereozän Nordamerikas sehr häufig. Der Schädel war plump und kurz. Außer dieser noch zahlreiche andere Gattungen im Eozän Nordamerikas, in Europa nur †Brachydiastematherium (nur Unterkiefer bekannt).

In der Unterfamilie †Titanotheriinae hat Osborn (1902) vier Stammreihen nachgewiesen, die durch die Gattungen †Titanotherium, †Megacerops, †Symborodon und †Brontotherium vertreten sind.

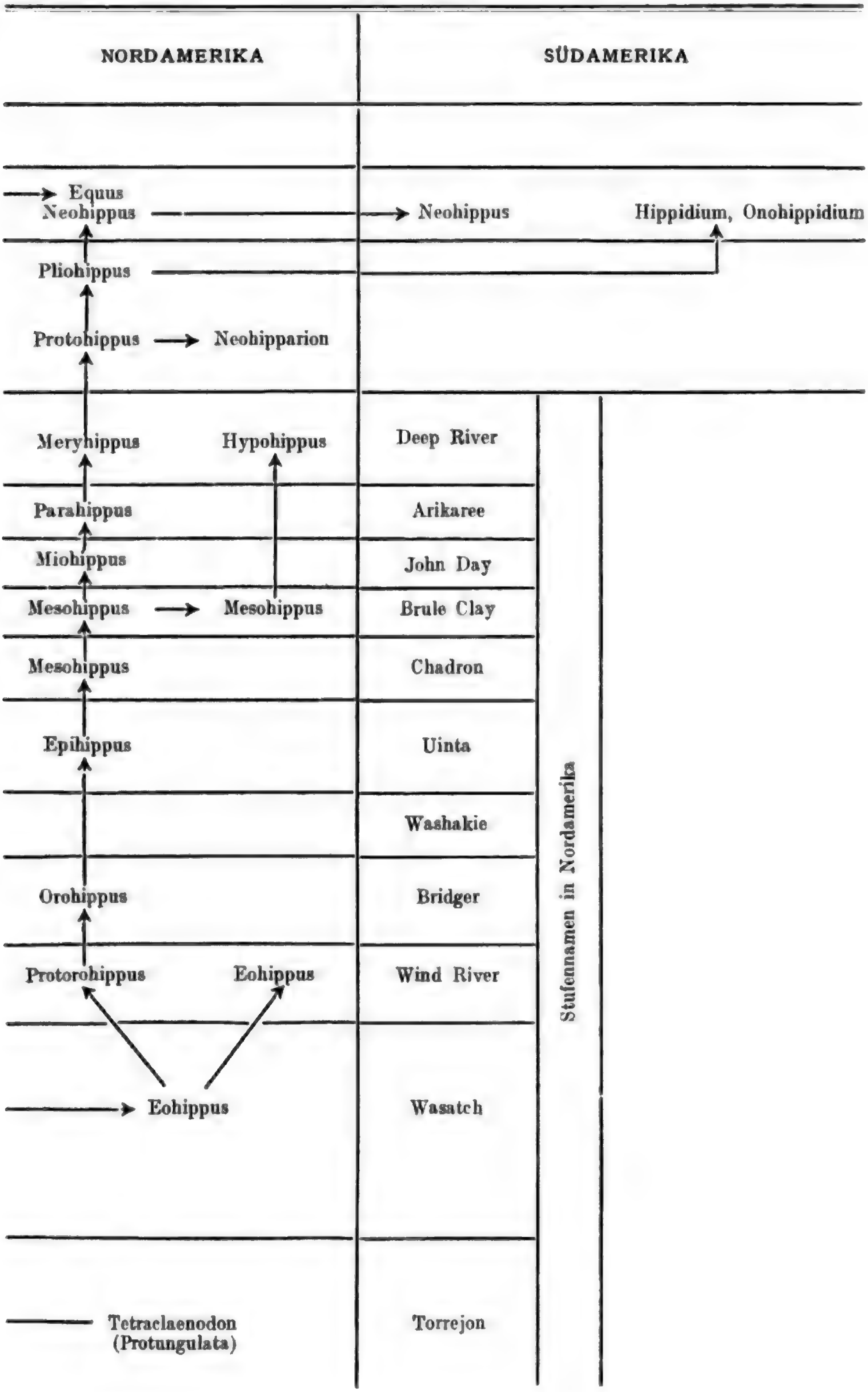
I. Stamm: †Titanotherium. — Dolichocephaler Schädel mit kurzen, divergenten Hörnern vor den Augenhöhlen. Nasenbeine lang, schmal. I rudimentär, C sehr lang, spitz; $\frac{4}{4}$ P.

II. Stamm: †Megacerops. — Brachycephaler Schädel mit kurzen, weiter vorn stehenden Hörnern; Nasenbeine kurz und breit; ein bis zwei

Stammesgeschichte



der Equiden.


NORDAMERIKA
SÜDAMERIKA
Equus
Neohippus
Neohippus
Hippidium, Onohippidium
Pliohippus
Protohippus
Neohipparion
Merychippus
Hypohippus
Deep River
Parahippus
Arikaree
Miohippus
John Day
Mesohippus
Mesohippus
Brule Clay
Mesohippus
Chadron
Epihippus
Uinta
Washakie
Orohippus
Bridger
Protorohippus
Eohippus
Wind River
Eohippus
Wasatch
Tetraclaenodon
(Protungulata)
Torrejon
Stufennamen in Nordamerika

Paar Inzisiven oben und unten; C von mittlerer Länge, spitz; $\frac{4}{4-3}$ P.

III. Stamm: †Symborodon. — Sehr lange Hörner unmittelbar über den Augenhöhlen. Nasenbeine dünn. I fehlend, C sehr klein.

Halbmonden aufgebaut (bei †Titanotheriiden der untere M_3 mit drei Halbmonden). Zuerst im Oligozän Europas (†Schizotherium), dann im Miozän von Nordamerika (†Moropus) und zur selben Zeit in Europa (†Macrotherium). Aus der letzteren Gattung ging †Chalicotherium hervor,

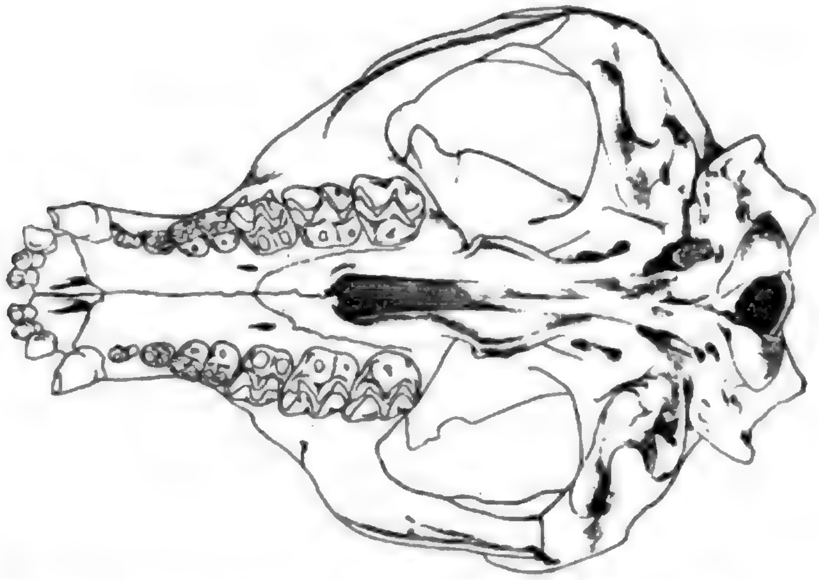


Fig. 106. Schädel von †Palaeosyops Leidyi aus dem Mitteleozän Nordamerikas. Etwa 1/5 natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

IV. Stamm: †Brontotherium. — Zu bedeutender Größe anwachsend. Hörner vor den Augenhöhlen. Schädel durch enorme Entwickelung des Hinterhaupts lang erscheinend, aber trotzdem brachycephal. Nasenbeine verkürzt. $\frac{2}{2}$ I. — C kurz und stumpf; $\frac{4-3}{4-3}$ P.

Hauptverbreitung im Oligozän Nordamerikas, in Europa nur vereinzelte Zähne im Tertiär Rumäniens.

†XX. Ordnung: Ancylopoda.

†1. Familie: Chalicotheriidae.

Gebiß titanotherienartig. Hand und Fuß dreizehig, mit retraktilen Endkrallen; Endphalangen tief gespalten. Obere M mit W-förmiger Außenwand, einem großen und einem kleinen Innenhöcker. Untere M aus zwei V-förmigen

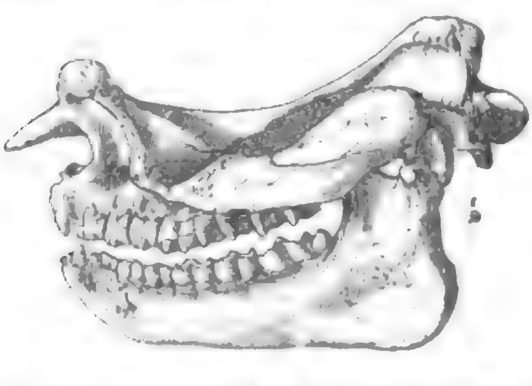


Fig. 107. Schädel von †Megacerops Marshi. Mittlere Titanotherium-Beds (Unteroligozän Nordamerikas). Etwa 1/13 natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn.

das im Unterpliozän in Eurasien verbreitet war und in China im Plistozän erlosch. Die †Chalicotherien scheinen Steppentiere gewesen zu sein; ihre Nahrung muß aus weichen, saftigen Pflanzen bestanden haben. Die großen Krallen



Fig. 108. Vierte Zehe von †Macrotherium aus dem Miozän von Sansans in Frankreich. Von der Seite gesehen. 1/2 natürlicher Größe. Nach A. Gaudry.

(Fig. 108) befähigten die Tiere wahrscheinlich zum Ausgraben unterirdischer Pflanzenknollen in Zeiten der Trockenheit.

XXI. Ordnung: Primates (Herrentiere).

1. Subordnung: Lemuroidea (Halbaffen = Prosimiae).

Die Abgrenzung dieser ältesten Primaten hat wegen der primitiven Merkmale mehrerer Gattungen, die von verschiedenen Autoren den Halbaffen eingereiht wurden, große Schwierigkeiten bereitet und es bestehen noch jetzt Meinungs-

unterschiede über die Stellung einzelner Familien wie der †Hyopsodontidae und der †Mixodectidae. Sie sind nach dem Vorschlage von Max Schlosser (1911) hier den Insectivoren eingereiht worden. Somit bleiben einstweilen nur sechs Familien im Verbande der Lemuroidea: die †Adapidae, †Notharctidae, †Anaptomorphidae, Tarsiidae, Lemuridae, †Archaeolemuridae und Chiromyidae.

Alle Halbaffen haben eine opponierbare Großzehe und sind fast immer fünfzehig. Die Finger und Zehen tragen Nägel oder Krallen; der Schädel fällt durch die Größe der Augenhöhlen auf, die bei den primitiveren Formen seitlich gestellt, bei den spezialisierteren nach vorn gerückt und stets gegen hinten durch eine Knochenwand abgeschlossen sind. Das fast immer vollständige Gebiß erleidet bei den †Adapidae durch den Verlust eines oberen und unteren I jederseits eine Reduktion; bei den †Anaptomorphidae können die unteren I bis auf einen reduziert sein und ebenso fehlen bei †Anaptomorphus die beiden vorderen unteren P. Den Tarsiidae fehlen die vorderen P sowie zwei untere I. Bei den echten Lemuren fehlt im Schneidezahn- und Lückenzahnabschnitt oben und unten je ein Zahn; weitgehende Reduktionen zeigen die †Archaeolemuridae und Chiromyidae.

Heute vorwiegend madagassisch, in geringer Zahl auch in Südafrika und Südasien, waren die Lemuroidea im Eozän in Europa und Nordamerika verbreitet. Sie sind jedenfalls seit sehr früher Zeit vom Stamme der Anthropoidea oder echten Affen getrennt, deren älteste Gattungen im Unteroligozän Aegyptens erscheinen. Unter den Lemuroidea kommen als Stammformen der Anthropoidea in erster Linie folgende Gattungen in Betracht: †Anaptomorphus, †Notharctus, †Pelycodus und †Cryptopithecus.

1. Sektion: Pseudolemuroidini (primitive Beschaffenheit von J, C und M).

†1. Familie: Adapidae.

Unter- bis Obereozän von Europa; unteres bis oberes Eozän Nordamerikas. $\frac{2}{2}$ I.

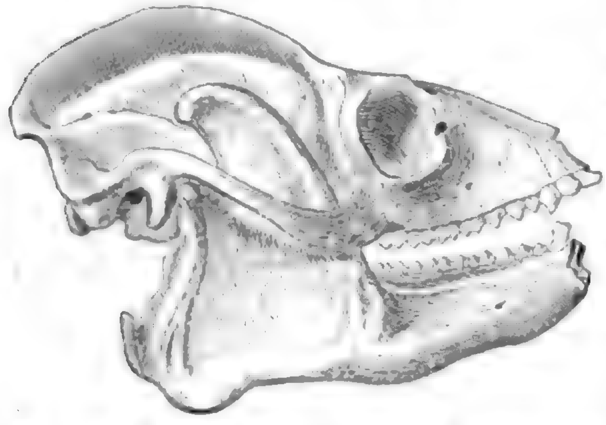


Fig. 109. Adapis parisiensis. — Phosphorite des Quercy in Frankreich (Obereozän). Schädel in natürlicher Größe. Nach H. Filhol.

Man kennt nur von †Adapis (Obereozän Frankreichs und der Schweiz) und †Pronycticebus (Phosphorite des Quercy, Frankreich) fast vollständige Schädel, von den übrigen Gattungen nur Schädel- oder Unterkieferfragmente. Der Gesamtcharakter des Schädels ist lemuridenähnlich, ebenso das übrige, nicht vollständig bekannte Skelett (namentlich Humerus, Ulna, Radius, Femur, Calcaneus, Astragalus).

Die älteste Adapidengattung ist †Protadapis aus dem Untereozän von Reims in Frankreich, von Epernay und aus den Phosphoriten des Quercy. Nur Kieferfragmente mit Zähnen bekannt.

Das Gebiß von †Adapis ist durch schaufelförmige obere und meißelförmige untere I, durch kleine obere Eckzähne (Spitze stumpf), einfache P und vierhöckerige obere und untere

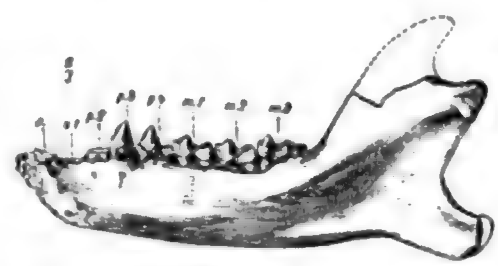


Fig. 110. Unterkiefer von †Pelycodus frugivorus. Wasatch. Natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn 1902.

M gekennzeichnet. Die vier unteren Höcker durch zwei schräge Kämme verbunden. — Aus dem Gips des Montmartre in Paris vollständigere Reste bekannt.

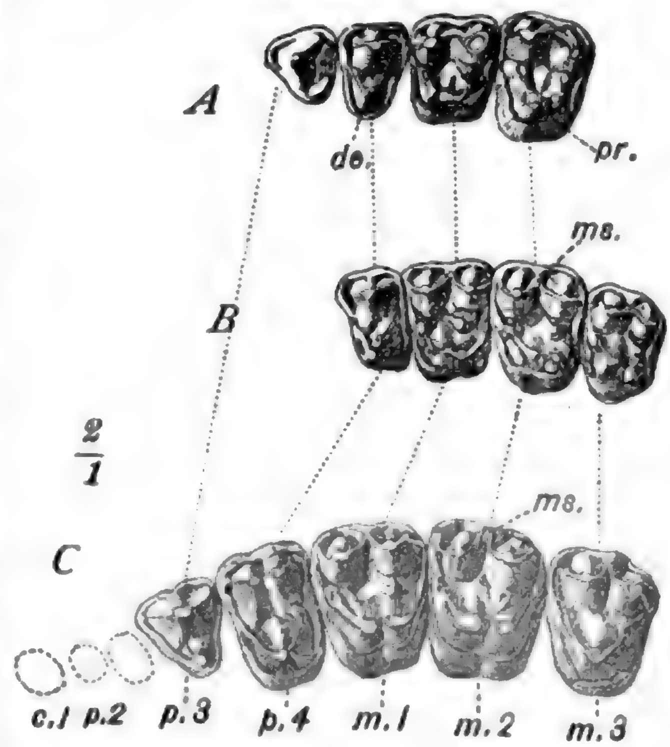


Fig. 111. A †Pelycodus frugivorus. Wasatch. $^2/_1$ natürlicher Größe. B †Notharctus nunienus. Wasatch. $^2/_1$ natürlicher Größe. C †Notharctus spec. Bridger. $^2/_1$ natürlicher Größe. (Entwickelung der oberen Molaren der Notharctiden.) Nach H. F. Osborn 1902.

†2. Familie: Notharctidae.

Untereozän (Wasatch) bis Obereozän (Uinta) Nordamerikas.



Fig. 112. Schädel von †Anaptomorphus homunculus. Wasatch Beds. Natürliche Größe. Nach H. F. Osborn 1902.

†Pelycodus. Im Wasatch. Geht im Wind-River in Notharctus über.

†Notharctus. Vom Wind River bis Uinta.

†Pelycodus:	†Notharctus:
Schnauze lang. — Unterkiefersymphyse nicht koossifiziert. — Obere M dreieckig mit orimentärem Hypocon; kein Mesostyl vorhanden.	Schnauze kurz. — Unterkiefersymphyse koossifiziert. — Obere M quadratisch, mit gut entwickeltem Hypocon; Mesostyl vorhanden.

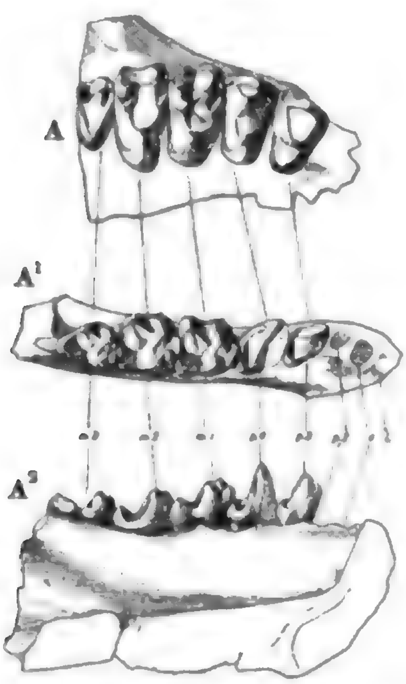


Fig. 113. A Oberkiefermolaren, A_1 und A_2 Unterkiefermolaren von †Anaptomorphus homunculus. Wasatch. $^3/_1$ natürlicher Größe. Nach H. F. Osborn 1902.



Fig. 114. †Necrolemur antiquus. Phosphorite des Quercy, Frankreich (Obereozän). Schädel in natürlicher Größe. Nach H. Filhol.

2. Sektion: Palaeopithecini (Prämolarenzahl reduziert).

†3. Familie: Anaptomorphidae.

Eozän von Nordamerika und Europa.

Der brachycephale Schädel ist kurzschnauzig, die schräg nach vorn gerichteten Augenhöhlen

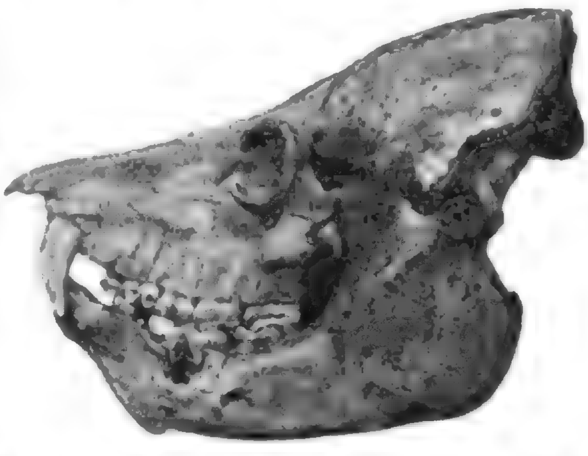


Fig. 115. †Megaladapis Edwardsi. Jungquartär von Andromahana, Madagaskar. $^2/_9$ natürlicher Größe. Nach L. von Lorenz 1905.

sehr groß, was auf nächtliche Lebensweise hindeutet. Lacrymale und Tränengrube liegen zum größten Teil auf der Gesichtsseite vor der Augenhöhle, die hinten durch eine Spange verschlossen ist.

Die wichtigste Gattung ist †Anaptomorphus; von †Anaptomorphus homunculus (Wasatch) ist ein gut erhaltener Schädel bekannt. (Fig. 112.) Obere M trituberkulär, viel breiter als lang; (Fig. 113.) obere I unbekannt, der kleine stiftförmige obere C durch kleine Lücke von den P getrennt, P_1 und P_2 fehlen. Untere P sehr hoch, spitz; Talonid der M sehr breit, niedrig, Trigonid hoch. Schädelhöhle geräumig. — Die jüngste †Anaptomorphusart im Uinta (†Anaptomorphus uintensis). Zur gleichen Familie gehört die erloschene Formenreihe von †Necrolemur (Fig. 114) aus dem Obereozän Europas.

4. Familie: Tarsiidae.

Die durch den lebenden Tarsius spectrum (Gespensteraffe) repräsentierte Familie ist fossil noch nicht nachgewiesen.

3. Sektion: Neolemuroidini (Molaren primitiv, I und C spezialisiert).

5. Familie: Lemuridae.

Auf Madagaskar beschränkt, woher die ältesten Gattungen aus jungquartären Ablagerungen bekannt sind (Torfmoore von Ambolisatra, Belo, Höhlen von Andrahomana).

†Megaladapis (Fig. 115). Bedeutende Körpergröße, die zwischen Schimpanse und Mensch schwankt. Schlosser (1911) betrachtet †Megaladapis als den Nachkommen von †Adapis, was jedoch Stehlin (1912) bestreitet und †Adapis als einen erloschenen Stamm betrachtet. Zahnformel von †Megaladapis (nach L. v. Lorenz, 1905) $\frac{0.1.3.3}{3.1.2.3}$.

†Palaeopropithecus, aus dem Jungquartär von Madagaskar. Zahnformel $\frac{2.1.2.3}{2.0.2.3}$.

†6. Familie: Archaeolemuridae.

Diese erloschene Familie, die auffallenderweise im Zahnbau Beziehungen zu den Cercopitheciden zeigt, ist nur aus dem Jungquartär von Madagaskar bekannt. †Archaeolemur, †Bradylemur, †Hadropithecus. Zahnformel $\frac{2.1.3.3}{2.0.3.3}$. — Der Schädel von †Archaeolemur besitzt eine sehr geräumige Hirnhöhle; das Schädeldach trägt keinen Sagittalkamm; die Augenhöhlen sind nach vorn gerichtet.

7. Familie: Chiromyidae.

Lebend: Chiromys madagascariensis. Ob einzelne Kieferstücke und Gliedmaßenreste aus dem Bridger von Wyoming zu den Chiromyiden gehören (†Metachiromys), ist noch zweifelhaft.

2. Subordnung: Anthropoidea (Affen).

Die ersten echten Affen erscheinen im Unteroligozän Aegyptens und die Merkmale ihres Gebisses weisen darauf hin, daß wir den Ursprung der Anthropoidea bei den Anaptomorphidae zu suchen haben.

Im Mittelmiozän erscheinen auch in Europa echte Affen; etwa gleichzeitig tritt in Südamerika der erste Cebide, †Homunculus patagonicus (Santa-Cruz-Schichten) auf. Da Südamerika vom Untereozän bis zum Unterpliozän gänzlich von den anderen Weltteilen abgeschnitten war, so müssen die platyrrhinen Affen bezw. deren Ahnen schon im Untereozän von Nordamerika aus mit den übrigen Elementen der neogäischen Fauna eingewandert sein und wir haben im Eozän Patagoniens primitive Anthropoidea ebenso zu erwarten wie primitive Nagetiere, die gleichfalls schon im Untereozän von Nordamerika aus eingewandert sein müssen, obwohl die ältesten Reste von Rodentiern in Südamerika erst an der oberen Grenze des Oligozäns in den Pyrotheriumschichten auftreten (Caviinae). Auch im Miozän und Plistozän Südamerikas finden sich Vertreter der rein neogäischen Platyrrhinen.

Im Pliozän treten Affen auch in Asien auf. Pithecanthropus gehört jedoch bereits dem Plistozän an. Aus dem Plistozän Chinas hat Schlosser einen isolierten Zahn beschrieben, der vielleicht einem großen Menschenaffen angehört.

Die primitivsten Affen aus dem Unteroligozän Aegyptens schließen sich den †Anaptomorphidae an, während sich der Stamm der Menschenaffen zum Teil parallel mit dem Hominidenstamm aus einer gemeinschaftlichen Wurzel entwickelt hat.

†1. Familie: Parapithecidae.

Nur Unterkiefer bekannt. Nur aus dem Unteroligozän Aegyptens bekannt. — I klein, C klein, nach vorn gerichtet; $P_{\overline{1}}$ fehlt, $P_{\overline{2}}$ einwurzelig, $P_{\overline{3}}$ und $P_{\overline{4}}$ zweiwurzelig. Unterkieferhälften erst im Alter fest verbunden.

†Parapithecus (Fig. 116), †Moeripithecus.

2. Familie: Hapalidae (Krallenaffen).

Fossil in Knochenhöhlen Brasiliens. Lebend und fossil nur in Südamerika.

3. Familie: Cebidae (Greifschwanzaffen. Platyrrhini).

Die ältesten Cebiden im Miozän Patagoniens; fossil im Plistozän Brasiliens; lebend und fossil nur in Südamerika.

†Homunculus (Fig. 117). Miozän Patagoniens.

†Anthropops (Fig. 118). Miozän Patagoniens. Nur Unterkieferfragment bekannt.

†Eudiastatus (Fig. 119).

4. Familie: Cynopithecidae (Hundsaffen).

Diese Familie umfaßt die Paviane, Makake, Meerkatzen, Stummelaffen und Schlankaffen. Die ersten Hundsaffen, die sich bereits enge an lebende Gattungen anschließen, erscheinen im Unterpliozän von Europa und Ostindien (Siwalik Hills); im Oberpliozän von Europa und Ostindien (Siwalik Hills) treten gleichfalls Hundsaffen auf, verschwinden aber bis auf die einzige noch in Europa wildlebende Gattung Macacus (Inuus) schon am Ende der Pliozänzeit. Nur Macacus ist an mehreren Stellen im Plistozän Europas entdeckt worden (Württemberg; Haute Garonne; Sardinien bei Cap Faro). Heute leben Cynopitheciden außer in Europa noch in Afrika und Asien und sind eine typisch altweltliche Gruppe geblieben.

†Mesopithecus. Der am besten bekannte fossile Affe. In Pikermi in Attika (Unterpliozän) häufig (Fig. 120).

†Oreopithecus. Unterpliozän vom Monte Bamboli in Toskana.



Fig. 116. †Parapithecus Fraasi. Unteroligozän des Fayûm, Aegypten. Unterkiefer in natürlicher Größe. Nach M. Schlosser 1911.

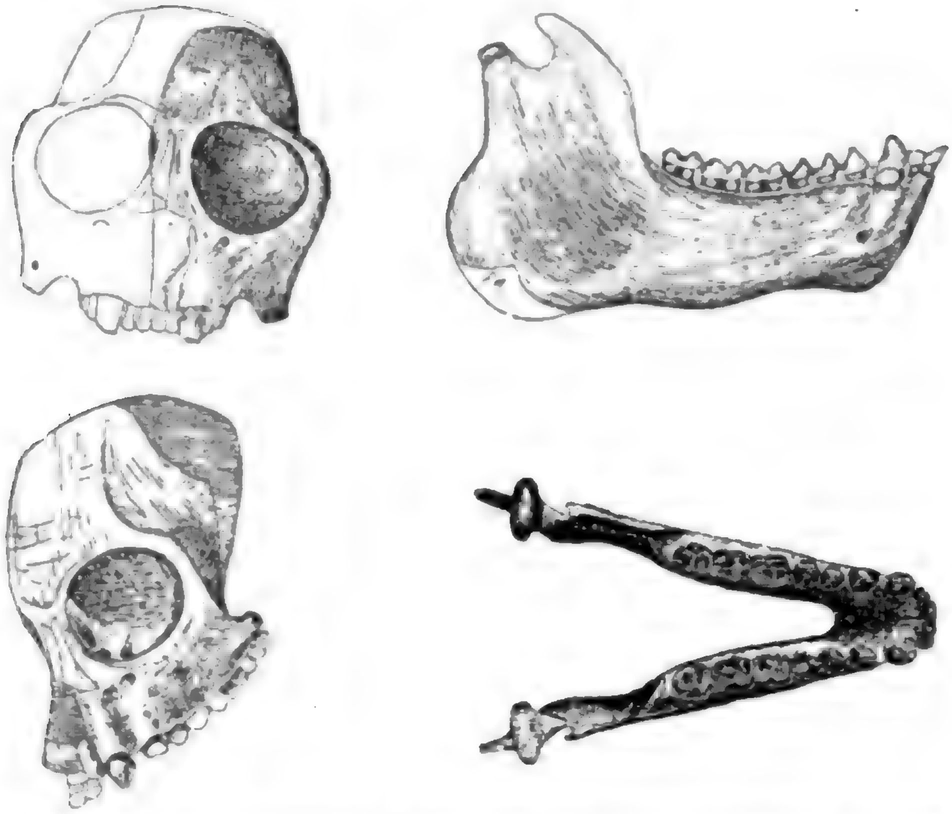


Fig. 117. †Homunculus patagonicus. Miozän von Santa Cruz in Patagonien. Schädel und Unterkiefer in natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

Im Oberpliozän Ostindiens Cynocephalus; im Pliozän von Europa und Indien Semnopithecus; der mit †Mesopithecus nahe verwandte Felsenaffe Macacus schon im Mittelpliozän Europas, im Pliozän und Plistozän von Ostindien, Plistozän von Java, Plistozän von Europa.

5. Familie: Simiidae (Menschenaffen).

Nur in Europa (fossil), Afrika (fossil und lebend), Asien (fossil und lebend). Die Simiidae stehen den Hominiden nahe, sind aber schon wahrscheinlich seit dem Alttertiär von ihnen getrennt und stellen einen selbständigen Zweig der Primaten dar.



Fig. 118. Anthropops perfectus. Miozän von Santa Cruz, Patagonien. Unterkieferfragment in natürlicher Größe. Nach F. Ameghino.

†Propliopithecus (Fig. 121). Der primitivste und älteste Simiide wurde von M. Schlosser (1911) aus dem Unteroligozän Aegyptens beschrieben. Zweifellos steht er dem miozänen

†Pliopithecus sehr nahe, der von zahlreichen Fundorten aus Mitteleuropa bekannt ist. Dieser kleine Gibbon ähnelt den lebenden Hylobatesarten besaß jedoch einen höheren Unterkiefer. Hylobates selbst ist fossil noch nicht bekannt.



Fig. 119. Unterkieferfragment von †Eudiastatus lingulatus. Miozän von Santa Cruz in Patagonien. Natürliche Größe. Nach F. Ameghino.

†Palaeopithecus aus dem Pliozän der Siwalik Hills in Ostindien. Scheint mit dem Schimpansen am nächsten verwandt zu sein.

†Dryopithecus (Fig. 122). Miozän und Unterpliozän von Mitteleuropa und Südeuropa (St. Gaudens, Nordabhang der Pyrenäen). Die Molaren erinnern von allen



Fig. 120. Mesopithecus pentelicus. Unterpliozän von Pikermi. Etwa $^1/_{10}$ natürlicher Größe. Nach A. Gaudry.

Simiiden am meisten an Menschenmolaren. Ein Femur aus dem Unterpliozän von Eppelsheim wird von M. Schlosser mit isoliert gefundenen Molaren aus den schwäbischen Bohnerzen zu †Dryopithecus rhenanus vereinigt, während die französischen Unterkieferreste und

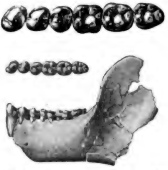


Fig. 121. Propliopithecus Haeckeli. Unteroligozän des Fayûm, Aegypten. Unterkiefer in natürlicher Größe. Oben: Unterkieferzähne in $^2/_1$ natürlicher Größe. Nach M. Schlosser 1911.

ein Humerus zu †Dryopithecus Fontani gestellt werden. Im Miozän des Wiener Beckens ein isolierter, kaum angekauter unterer Molar (M_3), der sicher zu Dryopithecus gehört († Dryopithecus Darwini). Vor kurzem auch in Ostindien entdeckt.

†Griphopithecus. Miozän des Wiener Beckens. Nur ein isolierter, oberer Molar bekannt († Griphopithecus Suessi).

†Neopithecus (= Anthropodus Schlosser). Nur ein isolierter, unterer Molar (M_3) aus den Bohnerzen von Salmendingen bekannt. (†Neopithecus Brancoi). Wahrscheinlich unterpliozän.

6. Familie: Hominidae.

Der vielfach als „Missing link" betrachtete Pithecanthropus erectus aus den plistozänen (nicht pliozänen) Kendengschichten von Trinil auf Java ist möglicherweise eine primitive Art der Gattung Homo und stellt keinesfalls eine Uebergangsform zu den Menschenaffen dar. Die Gattung Homo selbst ist aus Skelettresten erst aus dem Plistozän bekannt; der älteste menschliche Rest ist der Unterkiefer von Mauer bei Heidelberg, der als †Homo heidelbergensis von dem jüngeren †Homo primigenius abzutrennen ist. Die Säugetierfauna der Schichten von Mauer, in denen †Homo heidelbergensis entdeckt wurde, enthält noch viele altertümliche Elemente wie †Equus stenonis, †Equus Mosbachensis, †Ursus arvernensis, †Ursus Deningeri, †Rhinoceros etruscus usw. und repräsentiert jedenfalls eine ältere Stufe der Eiszeit. Nach W. Soergel (1912) gehört die Fauna von Mauer der ersten Interglazialzeit an.

Vom typischen „Eiszeitmenschen" Europas, dem sehr primitiven †Homo primigenius, sind bereits zahlreiche Skelettreste bekannt; mehrere Schädelfunde in den letzten Jahren, namentlich in Frankreich, haben uns in den Stand gesetzt, die Eigentümlichkeiten dieser erloschenen Menschenart genauer kennen zu lernen.

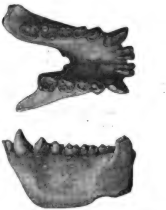


Fig. 122. Unterkiefer von Dryopithecus† Fontani aus dem Obermiozän von Saint-Gaudens in Frankreich. $^1/_2$ natürlicher Größe. Nach A. Gaudry.

Ueber die Entstehung der Gattung Homo und der Hominiden überhaupt dürfen wir nur in Tertiärbildungen Afrikas und Asiens, kaum in Europa, Aufschlüsse erwarten. In Südamerika ist der Mensch ebensowenig entstanden wie in Australien. Vielleicht geben uns weitere Funde im Alttertiär Nordafrikas eine Antwort auf die Frage nach dem Zeitpunkt der Abzweigung der Hominiden.

Literatur. *Größere Zusammenfassungen und Handbücher, in denen Literaturnachweise angegeben sind:* **K. A. von Zittel**, *Handbuch der Paläontologie, 4. Bd. Säugetiere, 1893.* — **Derselbe**, *Grundzüge der Paläontologie, 2. Bd. Säugetiere. Neu bearbeitet von* **Max Schlosser**, *1910.* — **M. Weber**, *Die Säugetiere, 1904.* — **Henry Fairfield Osborn**, *The Age of Mammals, 1911.* — **Derselbe**, *The Evolution of the Mammalian Molar Teeth.* — **A. Smith-Woodward**, *Outlines of Vertebrate Palaeontology.* — **O. Abel**, *Grundzüge der Paläobiologie der Wirbeltiere, 1912.*

O. Abel.

Saumriffe.

Synonym mit Küsten- oder Fransenriffe. Längs der Meeresküste hinziehende, von ihr durch einen schmalen Meereskanal getrennte Riffbildungen. Vgl. den Artikel „Meer“.

Säuren.

I. Allgemeiner Teil. A. Anorganische Säuren. B. Organische Säuren. II. Spezieller Teil. A. Anorganische Säuren. B. Organische Säuren. Anhang. Beschreibung einzelner wichtiger Säuren.

I. Allgemeiner Teil.

1. Begriff. 2. Nachweis. 3. Einteilung nach der Basizität. 4. Elektrolytische Dissoziation. 5. Messung der Stärke einer Säure.

1. Begriff. Der Begriff der „Säuren“ ist ebenso wie der der „Basen“ seit 1666 (Otto Tachenius) bekannt und seit dieser Zeit im wesentlichen ungeändert geblieben. Früher (Lavoisier 1781) glaubte man, daß ein wesentlicher Bestandteil aller Säuren der Sauerstoff wäre, der daher auch seinen Namen hat, doch nun weiß man seit langem, daß es auch sauerstoffreie Säuren gibt. Als Säuren bezeichnet man Stoffe, die mit Basen unter Wasseraustritt Salze bilden, oder, was praktisch dasselbe ist, Elektrolyte, die in wässeriger Lösung als Kationen H-Ionen abdissoziieren.

2. Nachweis. Alle Säuren geben in wässeriger Lösung einige gemeinsame Farbreaktionen und zwar färbt sich auf Zusatz von Säuren eine Lösung von

blauem	Lackmus	rot
rotem	Phenolphthalein	farblos
gelbem	p-Nitrophenol	farblos
gelbem	Methylrot	rot
gelbem	Methylorange	orange
rotem	Kongorot	blau

Dieser Farbenumschlag kann durch Zusatz von Basen wieder rückgängig gemacht werden (vgl. den Artikel „Basen“). Die Färbungen von Lackmus usw. bis Methylorange werden von schwachen und starken Säuren gegeben, die Blaufärbung von Kongorot aber wird nur von starken Säuren hervorgebracht. Dadurch kann man starke und schwache Säuren unterscheiden.

3. Einteilung nach der Basizität. Je nach der Zahl der durch Metalle ersetzbaren H-Atome, die eine Säure besitzt, nennt man sie ein-, zwei- oder mehrbasisch. So bezeichnet man z. B. als einbasisch die Salpetersäure HNO_3, als zweibasisch die Schwefelsäure H_2SO_4, als dreibasisch die Phosphorsäure H_3PO_4. Nicht alle im Molekül einer Säure vorhandenen Wasserstoffatome sind durch Metalle ersetzbar. So ist z. B. von den vier Wasserstoffatomen der Essigsäure $C_2H_4O_2$ nur eins durch Metall ersetzbar. Man bezeichnet die Essigsäure daher als einbasisch und schreibt ihre Formel HCH_3CO_2.

4. Elektrolytische Dissoziation. Alle Säuren sind in wässeriger Lösung elektrolytisch dissoziiert in der Weise, daß die durch Metalle vertretbaren Wasserstoffatome mit positiver Elektrizität geladen als Wasserstoffionen ($H^\cdot$) abdissoziiert werden. Die einbasischen Säuren sind also im Sinne des folgenden Gleichgewichts zerfallen:

$$HNO_3 \rightleftarrows H^\cdot + NO_3'$$
$$HCl \rightleftarrows H^\cdot + Cl'.$$

Die wässerige Lösung enthält drei Molekülarten nebeneinander, die undissoziierten Säuremoleküle, die $H^\cdot$-Ionen und die Säureanionen. Zweibasische Säuren sind primär in der Weise dissoziiert, daß ein $H^\cdot$-Ion vom Molekül abgespalten wird, z. B.

$$H_2SO_4 \rightleftarrows H^\cdot + HSO_4'.$$

Das Anion dissoziiert dann sekundär im Sinne der Gleichung:

$$HSO_4' \rightleftarrows H^\cdot + SO_4''.$$

Die wässerige Lösung von H_2SO_4 enthält also nebeneinander vier Molekülgattungen H_2SO_4, HSO_4', SO_4'' und $H^\cdot$.

Ganz entsprechend zeigen dreibasische Säuren eine primäre, sekundäre und tertiäre Dissoziation. Die sekundäre Dissoziation ist stets viel geringer als die primäre und die tertiäre wieder geringer als die sekundäre.

Es ist also ein allgemeines Charakteristikum aller Säuren, daß sie in wässeriger Lösung elektrolytisch dissoziiert sind und als Kationen $H^\cdot$-Ionen abspalten. Die Reaktionen, die wir oben als saure Reaktionen bezeichneten, sind also als Reaktionen auf die allen Säuren gemeinsame Molekülgattung, die $H^\cdot$-Ionen, aufzufassen.

5. Messung der Stärke einer Säure. Ein Maß für die Stärke einer Säure ist die Zahl der $H^\cdot$-Ionen, die sie bei gegebener Konzentration zu bilden vermag. Je stärker eine Säure dissoziiert ist, um so mehr $H^\cdot$-Ionen vermag sie zu bilden. Um die Stärke einer Säure zu bestimmen, muß man also ihren Dissoziationsgrad bei einer gegebenen Konzentration messen. Das kann geschehen durch Bestimmung

1. der elektrischen Leitfähigkeit,
2. der elektromotorischen Kraft von Konzentrationsketten,
3. der Reaktionsgeschwindigkeit,
4. der Verteilung einer Base zwischen zwei Säuren.

Dies sind im wesentlichen dieselben Methoden, die auch zur Bestimmung der

OH'-Konzentrationen dienen (vgl. den Artikel „Basen"). Nur müssen, wenn man die H'-Ionen-Konzentrationen durch die katalytische Beschleunigung von Reaktionsgeschwindigkeiten messen will, zum Teil andere Reaktionen gewählt werden als zur Bestimmung der OH'-Konzentrationen. Zur H'-Ionen-Konzentrationsbestimmung kann man benutzen: 1. die Esterverseifung: H_2O + Ethyl- (oder Methyl-) Acetat (oder -formiat) = Alkohol + Essigsäure (oder Ameisensäure); 2. die Zuckerinversion: H_2O + Saccharose = Dextrose + Lävulose; 3. die Diazoessigesterkatalyse: Wasser + Diazoessigester = Stickstoffgas + Glykolsäureester. Die Bestimmung des katalytischen Einflusses ist bei diesen Reaktionen einfacher als bei denen, die zur Bestimmung der OH'-Ionen-Konzentrationen dienten, da alle diese Reaktionen monomolekular sind. Es beteiligt sich also nur eine Art von Molekülen an der Reaktion und die entstehenden Stoffe haben keinen Einfluß auf die Reaktionsgeschwindigkeit.

Je nach ihrer Stärke teilt man die Säuren in starke, mittelstarke und schwache ein.

Als starke Säuren bezeichnet man solche, die in 1 normaler Lösung mehr als 50%, als mittelstarke solche, die mehr als 1% und als schwache solche, die weniger als 1% dissoziiert sind. Der Dissoziationsgrad der häufigsten Säuren (bei 25° C) ist in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

HJ	ist in	1 n	Lösung	zu	90,0%	dissoziiert
HBr	„ „	1 n	„	„	90,0%	„
HNO_3	„ „	1 n	„	„	88,9%	„
HCl	„ „	1 n	„	„	87,5%	„
$HMnO_4$	„ „	1 n	„	„	80,5%	„
H_2SO_4	„ „	1 n	„	„	51,0%	„
H_3PO_4	„ „	1 n	„	„	16,0%	„
HF	„ „	1 n	„	„	7,0%	„
H_2CO_3	„ „	0,1	„	„	0,17%	„
H_2S	„ „	0,1	„	„	0,07%	„
HCN	„ „	0,1	„	„	0,01%	„
H_3BO_3	„ „	0,1	„	„	0,01%	„

Mit steigender Konzentration nimmt der Dissoziationsgrad ab. So beträgt der Dissoziationsgrad der konzentrierten Säuren:

Säure	Molekulargewicht	Prozentgehalt[1]) ca.	Dissoziationsgrad %
konz. H_2SO_4	98	98	0,7
„ HNO_3	63	63	9,6
„ HCl	36	36	13,3

Da der Dissoziationsgrad sich mit der Konzentration ändert, die Dissoziationskonstante aber von der Konzentration unabhängig ist (vgl. den Artikel „Elektrolytische Dissoziation"), so wird man zum Vergleich der Stärke zweier Säuren lieber die letztere benutzen. Dies ist jedoch nur für schwache Säuren möglich, da für mittelstarke und starke Säuren das Ostwaldsche Verdünnungsgesetz ungültig ist, sich also keine Dissoziationskonstante berechnen läßt (vgl. „Anomalie der starken Elektrolyte" im Artikel „Elektrolytische Dissoziation"). Je stärker eine Säure ist, um so größer ist ihre Dissoziationskonstante. Als Beispiel seien die Dissoziationskonstanten einiger schwachen anorganischen Säuren angeführt:

Schweflige Säure	$1,6 . 10^{-2}$
Arsensäure	$5 . 10^{-3}$
Salpetrige Säure	$5 . 10^{-4}$
Kohlensäure	$3 . 10^{-7}$
Schwefelwasserstoff	$5,7 . 10^{-8}$
Borsäure	$6,6 . 10^{-10}$

Die Dissoziationskonstante ändert sich mit der Temperatur und zwar für verschiedene Säuren in verschiedener Weise. So kann von zwei Säuren bei der einen Temperatur die eine, bei anderer die andere stärker sein. Ein Beispiel hierfür bildet Kieselsäure und Wasser. Bei 0° C ist die Kieselsäure eine viel stärkere Säure als Wasser, bei 300° C aber ist Wasser stärker als Kieselsäure. Das ist z. B. für geologische Betrachtungen wichtig. Während bei gewöhnlicher Temperatur Hydroxyde durch Kieselsäure in Silikate verwandelt werden können, so können bei 300° Silikate unter Einwirkung des Wassers in Hydroxyde übergehen.

Literatur. *Vergleiche den Artikel „Basen".*

E. H. Riesenfeld.

A. Anorganische Säuren.

1. Bildungsweise. 2. Bezeichnung. 3. Säuren der Fluorgruppe. 4. Säuren der Sauerstoffgruppe. 5. Säuren der Stickstoffgruppe. 6. Säuren der Kohlenstoffgruppe. 7. Säuren der Borgruppe. 8. Saure Eigenschaften der Metallhydroxyde. 9. Komplexe Säuren. 10. Peroxysäuren. 11. Säurechloride.

1. **Bildungsweise.** Die sauerstoffreien Säuren können im allgemeinen durch Reduktion der betreffenden Elemente durch geeignete Reduktionsmittel oder durch direkte Vereinigung der Elemente mit Wasserstoff entstehen, z. B. $J_2 + H_2S = 2HJ + S$ und $J_2 + H_2 = 2HJ$. Die sauerstoffhaltigen Säuren sind die Hydrate der Oxyde von Metalloiden, sie bilden sich also durch Anlagerung von Wasser an diese Oxyde, z. B. $SO_3 + H_2O = H_2SO_4$. Auch die höheren (sauerstoffreicheren) Oxyde von Metallen, die in ihrem Verhalten den Metalloiden

[1]) Es ist ein rein zufälliges Zusammentreffen, daß das Molekulargewicht dieser Säuren gleich ihrem Prozentgehalte (g Säure in 100g Lösung) ist.

nahestehen, bilden durch Wasseranlagerung Säuren, z. B. $CrO_3 + H_2O = H_2CrO_4$.

2. Bezeichnung. Die sauerstofffreien Säuren werden in der Weise bezeichnet, daß man die Namen der Elemente, aus denen die Säuren bestehen, nebeneinandersetzt und die Endung „-säure" anhängt, z. B. Chlorwasserstoffsäure, Stickstoffwasserstoffsäure. Von den sauerstoffhaltigen Säuren, die ein Element zu bilden vermag, bezeichnet man die unter gewöhnlichen Bedingungen stabile und daher gebräuchlichste Säure als die Säure des betreffenden Stoffes schlechtweg, z. B. Schwefelsäure, Borsäure. Bisweilen nennt man an Stelle des Elementes auch das Salz, aus dem die Säure meist gewonnen wird, und hängt die Bezeichnung „-säure" an, z. B. Salpetersäure. Diese Bezeichnungsweise wird auch bei sauerstofffreien Säuren gebraucht, so nennt man die Chlorwasserstoffsäure meist Salzsäure.

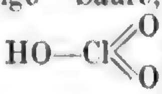
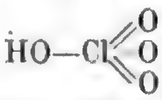
Die Säure der nächst niedrigeren Oxydationsstufe bezeichnet man als „-ige Säure", z. B. schweflige Säure, salpetrige Säure, die der nächst niedrigeren Oxydationsstufe als „unter(hypo)-ige Säure", z. B. unterchlorige Säure, hypophosphorige Säure. Ist eine sauerstoffhaltige Säure einer noch tieferen Oxydationsstufe des betreffenden Elementes bekannt, so wird sie als „hydro-ige Säure" bezeichnet, z. B. hydroschweflige Säure. Bildet das Element eine Säure, die sauerstoffhaltiger ist als die gebräuchlichste Säure des betreffenden Elementes, so nennt man diese Säure „Per-(Hyper-)Säure" oder „Ueber-Säure", z. B. Permangansäure, Ueberchlorsäure. Ein Teil der Uebersäuren gehört zur Gruppe der „Peroxysäuren" und wird unter 10 besonders besprochen. Als Beispiel für die Bezeichnung der Säuren seien einige Säuren des Schwefels mit den entsprechenden Oxyden angeführt:

Säure	Oxyd	Name
$H_2S_2O_8$	S_2O_7	Ueberschwefelsäure
H_2SO_4	SO_3	Schwefelsäure
H_2SO_3	SO_2	schweflige Säure
$H_2S_2O_4$	S_2O_3	hydroschweflige Säure
H_2S		Schwefelwasserstoffsäure

Leiten sich von dem gleichen Oxyd durch Addition einer verschiedenen Anzahl von Wassermolekülen verschiedene Säuren ab, so bezeichnet man die wasserreichste als Ortho-Säure, die nächst wasserärmere, die im allgemeinen durch Erhitzen aus der Ortho-Säure gebildet werden kann, als Pyro-Säure (τὸ πῦρ — das Feuer) und diejenige Säure, die aus der Pyro-Säure durch Wasseraustritt entsteht, als Meta-Säure, z. B.
$P_2O_5 + 3H_2O = 2H_3PO_4$ Orthophosphorsäure
$P_2O_5 + 2H_2O = H_4P_2O_7$ Pyrophosphorsäure
$P_2O_5 + H_2O = 2HPO_3$ Metaphosphorsäure.
In der Pharmazie und im Chemikalienhandel ist die lateinische Nomenklatur noch häufig. Bei dieser wird nach dem Worte „Acidum" bei sauerstofffreien Säuren der Name des Elementes mit der Endung „-atum hydricum" angefügt, z. B. Acidum chloratum hydricum — Salzsäure. Bei den sauerstoffhaltigen Säuren wird für die gebräuchlichste Oxydationsstufe an den Namen des Elementes die Endung „-icum" angehängt, z. B. Acidum chloricum — Chlorsäure. Die Ueber-(Hyper- oder Per-)Säure erhält die Vorsilbe „Hyper-" oder „Per-" vor den Namen des Elementes, z. B. Acidum perchloricum — Perchlorsäure; Acidum hypermanganicum — Permangansäure. Die „-ige Säure" hat die Endsilbe „-osum", z. B. Acidum chlorosum — chlorige Säure. Die „unter-ige Säure" hat die Bezeichnung hypo-osum, z. B. Acidum hypochlorosum — unterchlorige Säure, die „hydro-ige Säure" die Bezeichnung „hydro-osum", z. B. Acidum hydrosulfurosum — hydroschweflige Säure. Und ebenso werden bei der lateinischen Nomenklatur wie bei der deutschen zur Bezeichnung des Wassergehaltes die Vorsilben „Ortho-", „Pyro-" und „Meta-" angewandt, z. B. Acidum orthophosphoricum — Orthophosphorsäure. (Zu diesem und den folgenden Abschnitten sehe man auch den Artikel „Chemische Typen".)

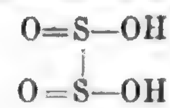
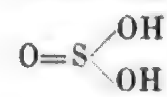
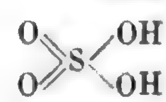
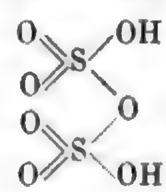
3. Säuren der Halogengruppe. Die Halogene bilden sauerstofffreie und (mit Ausnahme des Fluors) auch sauerstoffhaltige Säuren. Die Halogenwasserstoffsäuren sind schon bei 0° C gasförmig; ihre Stärke nimmt mit steigendem Atomgewicht zu. Die schwächste Säure ist also die Fluorwasserstoffsäure HF, dann kommt die Chlorwasserstoffsäure HCl, Bromwasserstoffsäure HBr und Jodwasserstoffsäure HJ. Die erstere zählt zu den mittelstarken, die drei letzteren zählen zu den starken Säuren. Die Säuren entstehen sämtlich durch Vereinigung der Elemente mit Wasserstoff. Bei höheren Temperaturen zerfallen sie wieder in ihre Elemente. Und zwar liegen die Gleichgewichte derart, daß z. B. bei 700° C HJ schon zu etwa 30% in J_2 und H_2 zerfallen ist, die Dissoziation von HBr in H_2 und Br_2 beträgt bei dieser Temperatur 0,1%, die Dissoziation von Chlorwasserstoff ist sehr gering, sie beträgt nur etwa 0,001% und HF ist noch nicht merklich dissoziiert. Ihre Stabilität nimmt also mit steigendem Atomgewicht ab. In ähnlicher Weise zeigen auch die anderen Eigenschaften dieser Verbindungen einen Zusammenhang mit dem Atomgewicht der Elemente. So steigt der Schmelz- und Siedepunkt der Halogenwasserstoffsäuren (mit Ausnahme des Fluors) mit steigendem Atomgewicht an, ebenso das spezifische Gewicht der wässerigen Lösungen gleicher Konzentration usw.

Von den Sauerstoffsäuren sind beim Chlor die folgenden Säuren entweder im freien Zustand oder in Form ihrer Salze bekannt:

H—Cl=O unter(hypo)chlorige Säure, HO—Cl=O chlorige Säure,  Chlorsäure,  Ueber- (Hyper-, Per-) Chlorsäure. Brom und Jod bilden die entsprechenden Säuren. Von diesen Säuren ist die Chlor- bezw. Brom- und Jodsäure die wichtigste.

4. Säuren der Sauerstoffgruppe. Wie die Elemente der Halogengruppe, so können auch die der Sauerstoffgruppe sauerstoffhaltige und sauerstofffreie Säuren bilden. Die sauerstofffreien Säuren, die Schwefelwasserstoffsäure H_2S, die Selenwasserstoffsäure H_2Se und die Tellurwasserstoffsäure H_2Te sind, wie die Halogenwasserstoffsäuren, schon bei Zimmertemperatur gasförmig. Ihr Schmelz- und Siedepunkt steigt ebenfalls mit steigendem Atomgewicht der Elemente an. Auch sie bilden sich durch direkte Vereinigung von Wasserstoff mit den entsprechenden Elementen und können sich wieder in diese und Wasserstoff zersetzen. Die Beständigkeit der Wasserstoffsäuren dieser Gruppe ist noch geringer als die der Halogenwasserstoffsäuren. So beträgt der Dissoziationsgrad des Schwefelwasserstoffs bei 700°C bereits 6% und der des Selenwasserstoffs und Tellurwasserstoffs, der noch nicht genauer bestimmt ist, ist entsprechend höher. Außer diesen Säuren bilden die Elemente dieser Gruppe aber auch sogenannte Polysäuren, in denen mehr als 1 Atom des Elementes mit 2 Atomen Wasserstoff zu einer Säure zusammengetreten ist. So bildet der Schwefelwasserstoff die folgenden Polyschwefelwasserstoffsäuren: H_2S_2, H_2S_3, H_2S_4 und H_2S_5. Auch das Wasserstoffsuperoxyd H_2O_2 (Näheres s. unter 10) gehört zu diesen Polysäuren. Es ist die dem H_2S_2 entsprechende Sauerstoffsäure. Die Polysäuren sind noch schwächere Säuren als die einfachen Wasserstoffsäuren.

Von den sauerstoffhaltigen Säuren dieser Gruppe sind besonders die des Schwefels näher untersucht, nämlich:

Oxyd	Säure	Konstitutionsformel
S_2O_3	$H_2S_2O_4$ hydroschweflige Säure	
SO_2	H_2SO_3 schweflige Säure	
SO_3	H_2SO_4 Schwefelsäure	
SO_3	$H_2S_2O_7$ Pyroschwefelsäure	

Von diesen Säuren sind nur die Schwefel- und Pyroschwefelsäure in reiner Form bekannt, die Formeln der anderen Säuren sind aus denen ihrer Salze abgeleitet.

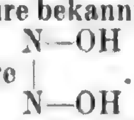
Auch sind eine Anzahl Säuren bekannt, die zwei und mehr Atome Schwefel in verschiedenen Wertigkeitsstufen enthalten, das sind:

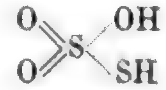
Formel siehe nächste Seite.

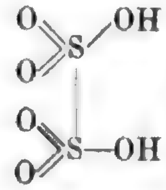
Die Konstitutionsformeln der Polythionsäuren $H_2S_xO_6$ sind nicht sicher bewiesen.

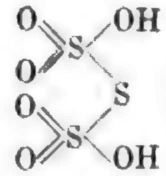
Ferner bildet der Schwefel noch zwei Peroxysäuren (s. unter 10). Auch die anderen Elemente dieser Gruppe bilden analog zusammengesetzte Säuren, die aber zum Teil noch nicht näher untersucht sind.

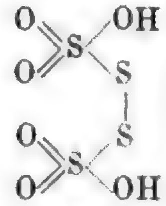
5. Säuren der Stickstoffgruppe. Von den Elementen der Stickstoffgruppe bildet nur der Stickstoff selbst eine sauerstofffreie Säure, nämlich die Stickstoffwasserstoffsäure N_3H, die auch schon eine außerordentlich schwache Säure ist. Die Wasserstoffverbindungen der anderen Elemente dieser Gruppe sind keine Säuren mehr.

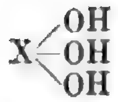
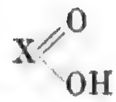
Ihre sauerstoffhaltigen Säuren leiten sich von den Oxyden X_2O, X_2O_3 und X_2O_5 ab. Von der niedrigsten Oxydationsstufe (X_2O) ist nur eine Säure bekannt, nämlich die untersalpetrige Säure . Von der Oxydationsstufe X_2O_3 leiten sich Ortho- und Metasäuren ab, welche die Konstitutionsformeln

$H_2S_2O_3$ Thioschwefelsäure 

$H_2S_2O_6$ Dithioschwefelsäure 

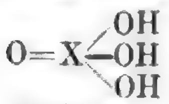
$H_2S_3O_6$ Trithioschwefelsäure  Polythionsäuren

$H_2S_4O_6$ Tetrathioschwefelsäure 

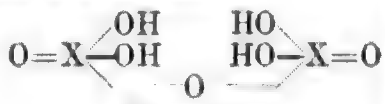
 

haben. Von den Orthosäuren sind die bekanntesten die phosphorige Säure H_3PO_3, die arsenige Säure H_3AsO_3 und die antimonige Säure H_3SbO_3. Von den Metasäuren ist die bekannteste die salpetrige Säure HNO_2.

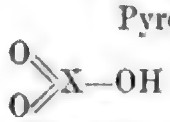
Von der höchsten Oxydationsstufe (X_2O_5) leiten sich Ortho-, Pyro- und Metasäuren ab, welche die Konstitutionsformeln



Orthosäure



Pyrosäure

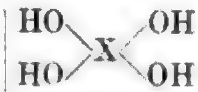


Metasäure

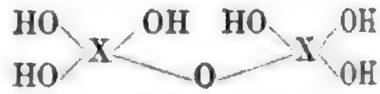
besitzen. Von den Orthosäuren sind die bekanntesten die Orthophosphorsäure H_3PO_4, die Arsensäure H_3AsO_4 und die Antimonsäure H_3SbO_4. Von den Pyrosäuren die Pyrophosphorsäure $H_4P_2O_7$ und von den Metasäuren die Salpetersäure HNO_3.

Die Stärke der Säuren nimmt mit steigendem Atomgewicht der säurebildenden Elemente ab. Von den Säuren eines jeden Elementes ist stets die Säure der höchsten Oxydationsstufe die relativ stärkste Säure und von den Säuren der gleichen Oxydationsstufe ist die Orthosäure stärker als die Pyro- und diese stärker als die Metasäure.

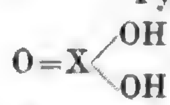
6. Säuren der Kohlenstoffgruppe. Die Elemente der Kohlenstoffgruppe bilden keine sauerstoffreien Säuren mehr, ihre sauerstoffhaltigen Säuren leiten sich vom Oxyd XO_2 ab. Sie haben die Konstitutionsformeln:



Orthosäure



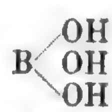
Pyrosäure



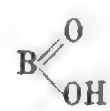
Metasäure

Die bekannteste von den Orthosäuren der Elemente dieser Gruppe ist die Orthokieselsäure H_4SiO_4. Die Orthotitansäure H_4TiO_4 und die Orthozirkonsäure H_4ZrO_4 sind kaum noch als echte Säuren zu bezeichnen, sie gehören eher zu den Metallhydroxyden (s. unter 8). Die wichtigste Pyrosäure ist die Pyrokieselsäure $H_6Si_2O_7$. Das Element mit dem niedrigsten Atomgewicht, der Kohlenstoff, bildet, ähnlich wie der Stickstoff, keine Ortho- und Pyrosäure, sondern nur eine Metasäure, nämlich die Kohlensäure H_2CO_3. Analog lautet die Formel der Metakieselsäure H_2SiO_3. Keine dieser Säuren ist in freier Form bekannt, da sie sofort in ihre Anhydride SiO_2 bezw. CO_2 und Wasser zerfallen. Aus den Formeln ihrer Salze kann man aber auf die der freien Säuren schließen.

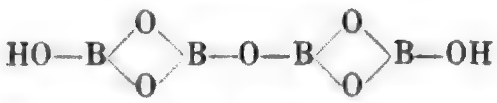
7. Säuren der Borgruppe. Von den Elementen dieser Gruppe ist nur noch das mit dem niedrigsten Atomgewicht, das Bor, Säuren zu bilden fähig. Die Oxyde der anderen Elemente dieser Gruppe sind basischer Natur und bilden daher mit Wasser Metallhydroxyde. Von dem Oxyd des Bors B_2O_3 leiten sich 3 Säuren ab, die



Orthoborsäure



Metaborsäure



Pyroborsäure (Tetraborsäure)

Alle drei Säuren sind in freier Form bekannt. Sie bilden bei Zimmertemperatur eine weiße, kristallinische Masse. Sie gehören zu den schwächsten Säuren.

8. Saure Eigenschaften der Metallhydroxyde. Auch die Metallhydroxyde, die eigentlich keine Säuren sondern schwache Basen sind, verhalten sich starken Basen gegenüber zuweilen wie schwache Säuren. So löst sich z. B. Aluminiumhydroxyd $Al(OH)_3$ in Natronlauge auf:

$$Al(OH)_3 + NaOH = NaH_2AlO_3 + H_2O.$$

Bei dieser Reaktion wird also die Natronlauge durch das Aluminiumhydroxyd neutralisiert unter Bildung eines Salzes (saures Natriumaluminat) und Wasser. Das Aluminiumhydroxyd verhält sich also hier der starken Base gegenüber wie eine Säure. Und ähnlich verhalten sich auch andere Metallhydroxyde, z. B. Zinkhydroxyd $Zn(OH)_2$.

9. Komplexe Säuren. Komplexe Säuren entstehen durch Anlagerung von Säuren an Salze, z. B. $PtCl_4 + 2HCl = H_2[PtCl_6]$, oder durch Anlagerung von Säuren an Säureanhydride, z. B.

$$H_3PO_4 + 12MoO_3 = H_3[PO_4(MoO_3)_{12}]$$

In analoger Weise bilden sich auch die Ferrocyanwasserstoffsäure $H_4[Fe(CN)_6]$, die Ferricyanwasserstoffsäure $H_3[Fe(CN)_6]$, die Phosphorwolframsäure $H_3[PO_4(WO_3)_{12}]$ usw.

In wässeriger Lösung sind diese komplexen Säuren in H·-Ionen und komplexe Ionen dissoziiert, z. B.

$$H_2[PtCl_6] = 2H^{\cdot} + [PtCl_6]''.$$

Das Komplexion ist wieder, wenn auch in geringerem Grade, weiter dissoziiert entsprechend der Gleichung:

$$[PtCl_6]'' = Pt^{\cdot\cdot\cdot\cdot} + 6Cl'.$$

Vgl. hierzu den Artikel „Salze".

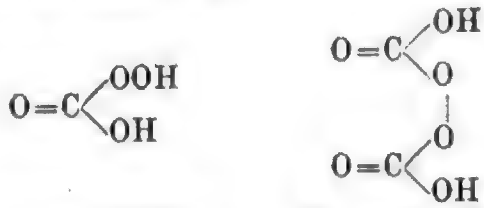
10. Peroxysäuren. Unter Peroxysäuren versteht man diejenigen Säuren, die sehr leicht unter Sauerstoff- oder Wasserstoffsuperoxyd-Austritt in gewöhnliche Säuren übergehen. Man nimmt daher an, daß bei ihnen zum Unterschiede von den anderen Säuren der Sauerstoff sich zum Teil in -O-O- Bindung befindet. Da die Peroxysäuren Sauerstoff leicht abzugeben imstande sind, stellen sie sehr wirksame Oxydationsmittel dar. Sie werden teils durch elektrolytische Oxydation, teils durch Anlagerung von Wasserstoffsuperoxyd an gewöhnliche Säuren erhalten.

Auch das Wasserstoffsuperoxyd HOOH hat schwach saure Eigenschaften und muß daher selbst als eine Peroxysäure bezeichnet werden. Nächst ihm sind die bekanntesten Peroxysäuren die beiden Peroxysäuren des Schwefels



Monoperoxyschwefelsäure, Carosche Säure — Monoperoxydischwefelsäure, Ueberschwefelsäure

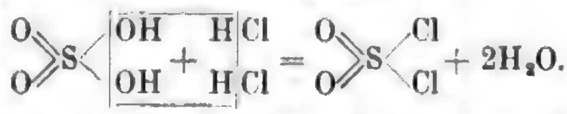
und des Kohlenstoffs

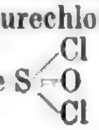
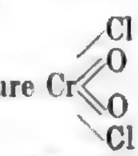


Monoperoxykohlensäure — Monoperoxydikohlensäure, Ueberkohlensäure.

Von diesen sind nur die Peroxysäuren des Schwefels in freien Form bekannt. Die Formeln der Peroxysäuren des Kohlenstoffs sind lediglich aus denen ihrer Salze abgeleitet. In ähnlicher Weise leiten sich auch von den Säuren des Bors, Chroms und vielen anderen Säuren Peroxysäuren ab.

11. Säurechloride. Wie Säuren und Basen unter Wasseraustritt sich zu Salzen vereinigen, so können auch zwei verschiedene Säuren unter Wasseraustritt zusammentreten. Sie bilden dann Säureanhydride. Die bekanntesten Säureanhydride sind die, bei denen Salzsäure mit anderen Säuren sich unter Wasseraustritt vereinigt, z. B.



Da in diesen Säureanhydriden je eine OH-Gruppe durch ein Cl ersetzt ist, so bezeichnet man diese auch als Säurechloride. Außer dem obengenannten Sulfurylchlorid sind die bekanntesten Säurechloride das Chlorid der schwefligen Säure  Thionylchlorid, das Chlorid der Chromsäure  Chromylchlorid und das Chlorid der salpetrigen Säure Cl—N=O Nitrosylchlorid. Alle diese Säurechloride nehmen bei Gegenwart von Wasser dieses auf und zerfallen in Säuren und Salzsäure. Die Säurechloride von Säuren, die den Metallhydroxyden näher

stehen, wie z. B. das der antimonigen Säure $SbOCl$ Antimonylchlorid, sind auch bei Gegenwart von Wasser beständig und verhalten sich in wässeriger Lösung wie gewöhnliche Chloride.

Literatur. *Vergleiche den Artikel „Basen".*

E. H. Riesenfeld.

B. Organische Säuren.

I. Allgemeines über organische Säuren.

Der Säurecharakter der organischen Säuren beruht ebenso wie bei den anorganischen auf dem Vorhandensein eines oder mehrerer ionisierbarer oder durch Metall ersetzbarer Wasserstoffatome. Auch in der organischen Chemie kann man zwischen Wasserstoff- und Sauerstoffsäuren unterscheiden. Die große Mehrzahl der organischen Säuren sind Sauerstoffsäuren. Organische Wasserstoffsäuren finden sich nur in der Gruppe der Cyanverbindungen, wie z. B. Blausäure (Cyanwasserstoffsäure) HCN, Ferro- und Ferricyanwasserstoffsäure $H_4Fe(CN)_6$ und $H_3Fe(CN)_6$ (vgl. den Artikel „Cyanverbindungen").

Nicht alle organischen Verbindungen, die durch Metall ersetzbare Wasserstoffatome enthalten, bezeichnet man als Säuren. Der Sprachgebrauch verfährt hierin ziemlich willkürlich. In der Regel beschränkt man jetzt den Namen „Säure" auf diejenigen Verbindungen, die in der sauren Gruppe neben Wasserstoff wenigstens noch zwei Sauerstoff- (oder Schwefel-) Atome an das säurebildende Element gebunden enthalten. Alkohole, Merkaptane, Oxime, Zucker u. dgl. bezeichnet man daher gewöhnlich nicht als Säuren. Auch die Phenole rechnet man jetzt nicht mehr dazu; Phenol selbst, sowie das Trinitrophenol haben von früher her noch die Namen Karbolsäure und Pikrinsäure behalten (vgl. den Artikel „Phenole"). Ferner sind auch die Säuren der Puringruppe, wie z. B. Harnsäure und Barbitursäure in diesem Sinn keine eigentlichen Säuren (vgl. den Artikel „Kohlensäurederivate").

Man unterscheidet bei den organischen Säuren zwischen Basizität und Wertigkeit. Die Basizität ist abhängig von der Zahl der sauren Gruppen, die die Verbindung enthält, so sind z. B. Essigsäure $CH_3{-}COOH$ und Benzolsulfosäure $C_6H_5{-}SO_3H$ einbasische Säuren; Bernsteinsäure $\begin{array}{l}CH_2{-}COOH\\|\\CH_2{-}COOH\end{array}$ oder Benzoldisulfosäure $C_6H_4\begin{array}{l}\diagup SO_3H\\\diagdown SO_3H\end{array}$ sind zweibasische Säuren. Bei der Wertigkeit werden außer den eigentlich sauren Gruppen auch die sonst noch vorhandenen Hydroxyl-(OH)-Gruppen mitgezählt; Glykolsäure $CH_2(OH){-}COOH$ oder Phenolsulfosäure $C_6H_4(OH){-}SO_3H$ sind einbasische zweiwertige Säuren, Weinsäure $\begin{array}{l}CH(OH){-}COOH\\|\\CH(OH){-}COOH\end{array}$ ist eine zweibasische vierwertige Säure usw.

Die Eigenschaften der organischen Säuren sind einmal bedingt durch das Vorhandensein der sauren Gruppe, sodann aber auch durch die Natur des mit dieser verbundenen organischen Restes. Sie vermögen daher alle diejenigen Reaktionen einzugehen, die durch die Konstitution dieses Restes begründet sind.

Ebenso wie die anorganischen Säuren zeigen auch die organischen, soweit sie in Wasser löslich sind, saure Reaktion. Mit Basen verbinden sie sich zu Salzen, mit Alkoholen zu Estern (s. diese). Von den mehrbasischen Säuren leiten sich außer den neutralen auch saure Salze und Ester ab, z. B.

$$\begin{array}{ll}COOK & COOK\\ | & |\\ COOK & COOH\end{array}$$

neutrales saures
Kaliumoxalat

$$\begin{array}{ll}CH_2{-}COOCH_3 & CH_2{-}COOCH_3\\ | & |\\ CH_2{-}COOCH_3 & CH_2{-}COOH\end{array}$$

neutraler saurer
Bernsteinsäuremethylester.

Auch einige einbasische Säuren, z. B. Essigsäure, vermögen saure Salze zu bilden. Diese sogenannten übersauren Salze beruhen auf dem Auftreten von Doppelmolekülen.

Wird die Hydroxylgruppe der Säure durch Chlor ersetzt, so entsteht ein Säurechlorid, beim Ersatz durch die Amino(NH_2)-Gruppe ein Säureamid. Die Stärke der organischen Säuren nimmt mit der Anzahl der sauren Gruppen zu. Doppelbindungen zwischen zwei Kohlenstoffatomen, mehr noch dreifache Bindungen verstärken ebenfalls den Säurecharakter. Bei homologen Reihen nimmt die Stärke mit wachsender Zahl der Kohlenstoffatome ab.

Die organischen Säuren lassen sich in zwei Hauptgruppen, Karbonsäuren und Nichtkarbonsäuren einteilen, je nachdem das Grundelement der sauren Gruppe Kohlenstoff oder ein anderes Element ist.

II. Karbonsäuren.

A. Allgemeines über Karbonsäuren.

Die Karbonsäuren sind durch das Vorhandensein einer oder mehrerer Karboxylgruppen $-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\nearrow O}{\searrow OH}$ gekennzeichnet. Ihre Basizität entspricht der Anzahl der Karboxylgruppen.

Eine Karboxylgruppe bildet sich immer da, wo man das Auftreten von drei an dasselbe Kohlenstoffatom gebundenen Hydroxylgruppen erwarten sollte. Derartige Orthosäuren mit drei Hydroxylgruppen sind nur als Ester bekannt, z. B. Orthoameisensäureester $H-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\nearrow OCH_3}{\searrow OCH_3}\!-OCH_3$. Im freien Zustand spalten sie Wasser ab unter Bildung einer Karboxylgruppe. Es entspricht dies einer in der organischen Chemie fast durchweg geltenden Regel, daß an dasselbe Kohlenstoffatom nicht gleichzeitig mehrere Hydroxylgruppen gebunden sein können (vgl. auch die Artikel „Aldehyde“ und „Ketone“).

Als Säureradikal (Acidyl, Acyl) bezeichnet man den mit der Hydroxylgruppe verbundenen Rest, z. B.

CH_3-CO-	CH_3-CH_2-CO-	$\begin{array}{l}CO-\\ \vert\\ CO-\end{array}$
Acetyl	Propionyl	Oxalyl
$\begin{array}{l}CH_2-CO-\\ \vert\\ CH_2-CO-\end{array}$	C_6H_5-CO-	$C_6H_4\genfrac{}{}{0pt}{}{\nearrow CO-}{\searrow CO-}$
Succinyl	Benzoyl	Phtalyl

1. Einteilung. Nach der Anzahl der Karboxylgruppen kann man die organischen Säuren in einbasische, zweibasische, dreibasische usw. einteilen. Den beiden Hauptgruppen der organischen Verbindungen entsprechend unterscheidet man Säuren der Fettreihe und zyklische Säuren. Während bei den ersteren der mit der oder den Karboxylgruppen verbundene Rest eine offene Kette von Kohlenstoffatomen bildet, enthalten die zyklischen Säuren einen geschlossenen Ring, der bei den isozyklischen Säuren nur aus Kohlenstoffatomen besteht, während er in den heterozyklischen Säuren daneben auch noch andere Elemente enthält.

Es gibt fernerhin gesättigte und ungesättigte Säuren, je nach dem Fehlen oder Vorhandensein von mehrfachen Bindungen zwischen zwei Kohlenstoffatomen.

2. Bildung und Darstellung. Karbonsäuren entstehen hauptsächlich durch Oxydation oder durch Hydrolyse.

Sehr viele organische Stoffe geben bei der Oxydation Karbonsäuren; insbesondere bilden sich diese bei der Oxydation primärer Alkohole, wobei als Zwischenprodukt ein Aldehyd auftritt, z. B.

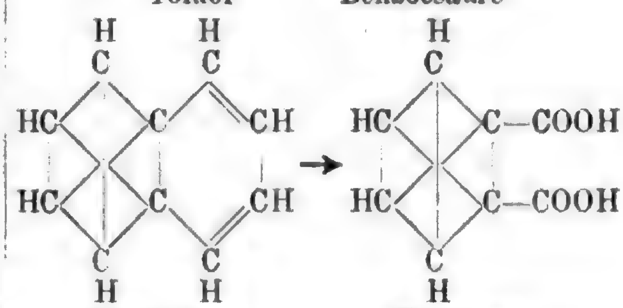
$$CH_3-CH_2-OH \quad CH_3-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\nearrow O}{\searrow H} \quad CH_3-C\genfrac{}{}{0pt}{}{\nearrow O}{\searrow OH}$$

Aethylalkohol Acetaldehyd Essigsäure

In zyklischen Verbindungen können auch Kohlenwasserstoffreste ohne weiteres zu Karboxylgruppen oxydiert werden, z. B.

$$C_6H_5-CH_3 \rightarrow C_6H_5-COOH$$

Toluol Benzoesäure



Naphtalin Phtalsäure

Durch Hydrolyse können Karbonsäuren entstehen

1. aus Estern, die in der Natur häufig vorkommen, wie z. B. die Fette,

$$C_3H_5(C_{16}H_{31}O_2)_3 + 3H_2O = C_3H_5(OH)_3 + 3C_{16}H_{32}O_2$$

Palmitin Glyzerin Palmitinsäure

2. aus Säureanhydriden

$$\begin{array}{l}CH_3-CO\\ \qquad\quad\;\; >O\\ CH_3-CO\end{array} + H_2O = 2CH_3-COOH$$

Essigsäureanhydrid Essigsäure

3. aus Säurechloriden

$$C_6H_5-COCl + H_2O = C_6H_5-COOH + HCl$$

Benzoylchlorid Benzoesäure

4. aus Säureamiden, die ebenfalls in der Natur vorkommen, z. B. Harnstoff, Asparagin, Hippursäure usw.,

$$CH_3-CONH_2 + H_2O = CH_3-COONH_4$$

Acetamid Ammoniumacetat

5. aus Trihalogensubstitutionsprodukten, wenn alle drei Halogenatome an dasselbe Kohlenstoffatom gebunden sind,

$$HCCl_3 \rightarrow HCOOH$$

Chloroform Ameisensäure

6. aus Nitrilen, wobei zunächst ein Säureamid entsteht, das dann weiter in das Ammoniumsalz der Säure übergeht,

$C_6H_5—CN \rightarrow C_6H_5—CONH_2 \rightarrow C_6H_5—COONH_4$
Benzonitril Benzamid Ammoniumbenzoat

Diese Methode wird namentlich zur Darstellung aromatischer Säuren angewandt, da die aromatischen Nitrile durch Umsetzung aus den Diazoverbindungen oder durch Verschmelzen der Sulfosäuren mit Cyankalium besonders leicht zugänglich sind.

Ferner dient sie zur Gewinnung von α-Oxysäuren aus den Cyanhydrinen, die man durch Anlagerung von Cyanwasserstoff an Aldehyde und Ketone ebenfalls sehr leicht erhält.

Andere Darstellungsmethoden für Karbonsäuren beruhen auf der Anlagerung von Kohlenoxyd oder Kohlendioxyd. Bei der Einwirkung von Kohlenoxyd auf geschmolzene Alkalien entsteht ameisensaures Salz

$$KOH + CO = HCOOK.$$

Entsprechend bilden sich aus Natriumalkoholaten und Kohlenoxyd kohlenstoffreichere Säuren, z. B.

$$CH_3—CH_2—ONa + CO = CH_3—CH_2—COONa.$$

In ähnlicher Weise wirkt Kohlendioxyd auf Phenolnatrium ein. Das zunächst gebildete phenolkohlensaure Natrium lagert sich sodann zu Phenolkarbonsäure um (Salizylsäuresynthese von **Kolbe**)

$$C_6H_5—ONa + CO_2 = C_6H_5—O—CO_2Na$$

$$C_6H_5—O—CO_2Na = C_6H_4\begin{cases}OH\\COONa\end{cases}$$

Auch durch Einwirkung von Kohlendioxyd (oder Schwefelkohlenstoff) auf organische Jodmagnesiumverbindungen erhält man Säuren (Reaktion von **Grignard**) z. B.

$$CH_3—MgJ + CO_2 = CH_3—COOMgJ$$

$$CH_3—COOMgJ + HJ = CH_3—COOH + MgJ_2$$

Zum Aufbau von höher molekularen Säuren aus solchen mit weniger Kohlenstoffatomen dienen die Acetessigester- und die Malonestersynthesen (s. den Artikel „**Fettsäuren**").

Ungesättigte Säuren entstehen beim Erhitzen von Aldehyden mit Salzen der Fettsäuren oder mit Malonsäure, z. B.

$$C_6H_5—CHO + CH_3—COONa = C_6H_5—CH = CH—COONa + H_2O$$

$$C_6H_5—CHO + CH_2\begin{cases}COOH\\COOH\end{cases}$$

$$= C_6H_5—CH=CH—COOH + H_2O + CO_2$$

Diese Methode wird besonders zur Darstellung ungesättigter aromatischer Säuren (Zimtsäuren) angewandt.

3. Verhalten. Das Verhalten der Karbonsäuren ist einmal abhängig von dem Vorhandensein der Karboxylgruppe, sodann von der Art des mit dieser verbundenen organischen Restes. Der letztere vermag alle diejenigen Reaktionen einzugehen, die seiner Konstitution entsprechen.

Auf dem Vorhandensein der Karboxylgruppe beruhen folgende Reaktionen. Das ionisierbare Wasserstoffatom dieser Gruppe kann ersetzt werden

1. durch Metalle (**Salzbildung** vgl. den Artikel „**Salze**")

$$CH_3—COOH + KOH = CH_3—COOK + H_2O$$

2. durch Alkyle (**Esterbildung** s. den Artikel „**Ester**")

$$CH_3—COOH + C_2H_5OH = CH_3—COOC_2H_5 + H_2O$$

3. durch Acidyle (**Anhydridbildung**, vgl. den Artikel „**Anhydride**")

$$CH_3—COOH + CH_3—COOH = CH_3—CO—O—CO—CH_3 + H_2O.$$

Die Hydroxylgruppe des Karboxyls läßt sich ersetzen

1. durch Chlor (**Säurechloride**). Man erhält Säurechloride durch Einwirkung der Chloride des Phosphors oder von Sulfurylchlorid oder Phosgen auf die freien Säuren oder ihre Salze, z. B.

$$3CH_3—COOH + PCl_3 = 3CH_3—COCl + H_3PO_3$$

$$C_6H_5—COOH + PCl_5 = C_6H_5—COCl + POCl_3 + HCl$$

$$2CH_3—COONa + POCl_3 = 2CH_3—COCl + NaPO_3 + NaCl$$

$$CH_3—COOH + SO_2Cl_2 = CH_3—COCl + SO_2 + HCl.$$

In entsprechender Weise erhält man auch Säurebromide oder Säurejodide.

Die Säurechloride sind meistens unzersetzt destillierende Flüssigkeiten von stechendem Geruch. Mit Wasser gehen sie wieder in Säuren, mit Ammoniak in Säureamide über

$$CH_3—COCl + H_2O = CH_3—COOH + HCl$$

$$C_6H_5—COCl + 2NH_3 = C_6H_5—CONH_2 + NH_4Cl.$$

2. durch NH_2 (**Säureamide**), $NH—NH_2$ (**Säurehydrazide**), N_3 (**Säureazide**), NHOH (**Hydroxamsäuren**). Ueber Darstellung und Verhalten dieser Verbindungen vgl. die Artikel „**Ammoniakderivate**" und „**Organische Basen**".

3. durch SH (**Thiolsäuren**). Thiolsäuren entstehen durch Einwirkung von Phosphorpentasulfid auf die Säuren oder von Kaliumsulfhydrat auf Säurechloride

$$5CH_3—COOH + P_2S_5 = 5CH_3—COSH + P_2O_5$$

$$C_6H_5—COCl + KSH = C_6H_5—COSH + KCl$$

Weiteres über Thiolsäuren vgl. den Artikel „**Thioverbindungen**".

Für die Hydroxylgruppe und das doppelt gebundene Sauerstoffatom der Karboxylgruppe können ein Stickstoffatom (**Nitrile**) oder eine NH_2- und eine NH-Gruppe (Ami-

dine)eintreten (vgl. die Artikel „Ammoniakderivate" und „Basen"). Ebenso können sie durch ein Schwefelatom und eine SH-Gruppe ersetzt werden (Thionthiolsäuren oder Karbithiosäuren; vgl. den Artikel „Thioverbindungen").

Unterwirft man die Salze der Karbonsäuren der trockenen Destillation, so entstehen unter Abspaltung von Kohlendioxyd Ketone (s. den Artikel „Ketone"), z. B.

$$\begin{matrix} CH_3-COO \\ CH_3-COO \end{matrix}\!\!>\!Ca = \begin{matrix} CH_3 \\ CH_3 \end{matrix}\!\!>\!CO + CaCO_3.$$

Setzt man beim Erhitzen ameisensaures Salz zu, so bilden sich in entsprechender Weise Aldehyde (s. den Artikel „Aldehyde"), z. B.

$$\begin{matrix} CH_3-COONa \\ + \; H-COONa \end{matrix} = CH_3-C\!\!\begin{matrix} /\!\!/O \\ \backslash H \end{matrix} + Na_2CO_3$$

Nimmt man die Destillation bei Gegenwart von überschüssigem Alkali vor, so entstehen Kohlenwasserstoffe, z. B.

$$C_6H_5-COONa + NaOH = C_6H_6 + Na_2CO_3.$$

B. Säuren der Fettreihe.

1. Einbasische Säuren. Die gesättigten einbasischen Säuren von der allgemeinen Formel $C_nH_{2n}O_2$ heißen Fettsäuren, da viele von ihnen in tierischen oder pflanzlichen Fetten vorkommen. Die Gruppe der ungesättigten einbasischen Säuren mit einer Doppelbindung von der allgemeinen Zusammensetzung $C_nH_{2n-2}O_2$ wird nach ihrem Anfangsglied als Acrylsäurereihe oder auch nach dem wichtigsten Glied als Oelsäurereihe bezeichnet. Die Säuren mit dreifacher Bindung $C_nH_{2n-4}O_2$ bilden die Propiolsäurereihe. Ihnen isomer sind die Säuren der Linolsäurereihe mit zwei Doppelbindungen. Auch noch weniger gesättigte Säuren sind in den natürlichen Fetten aufgefunden worden.

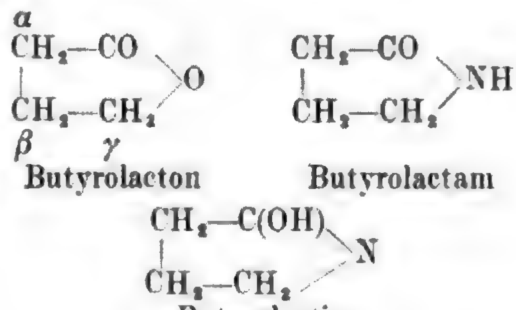
Durch den Eintritt von Halogen, Cyan, NH_2, OH usw. in den Kohlenwasserstoffrest der Fettsäuren entstehen substituierte Säuren. Die Stellung des eintretenden Substituenten wird durch griechische Buchstaben ausgedrückt, indem man das der Carboxylgruppe benachbarte Kohlenstoffatom mit α, das folgende mit β usw. bezeichnet. Im übrigen wird der Name des Substituenten vor den Namen der Säure gesetzt, z. B.

$$CH_3-\overset{*}{C}HCl-COOH$$
α-Chlorpropionsäure

$$CH_3-\overset{*}{C}H(OH)-CH_2-COOH$$
β-Oxybuttersäure

Alle Abkömmlinge mit wenigstens drei Kohlenstoffatomen, bei denen der Substituent nicht am Endkohlenstoffatom steht, enthalten ein asymmetrisches Kohlenstoffatom (*) und können daher in stereoisomeren und optisch aktiven Formen auftreten. Auch die Säuren der Oelsäurereihe kommen in stereoisomeren Formen vor, die aber nicht optisch aktiv sind (vgl. die Artikel „Isomerie" und „Drehung der Polarisationsebene").

Ein besonderes Verhalten zeigen die γ- und δ-Oxy- und Aminosäuren. Bei ihnen bildet sich durch Wasserabspaltung zwischen der Hydroxyl- oder Aminogruppe und der Carboxylgruppe ein fünf- oder sechsgliedriger Ring. Die so entstehenden inneren Ester heißen Lactone, die inneren Säureamide oder -imide Lactame und Lactime, z. B.



Butyrolacton Butyrolactam

Butyrolactim

Durch weitere Oxydation können die Oxysäuren zunächst in Aldehyd- oder Ketonsäuren übergehen, die neben der Karboxylgruppe noch eine Aldehyd- oder Ketongruppe enthalten, z. B.

CHO—COOH Glyoxylsäure

$CH_3-CO-COOH$ α-Ketopropionsäure = Brenztraubensäure

$CH_3-CO-CH_2-COOH$ β-Ketobuttersäure = Acetessigsäure

$CH_3-CO-CH_2-CH_2-COOH$ γ-Ketovaleriansäure = Lävulinsäure.

Diese Säuren werden jedoch meist auf andere Weise dargestellt. Weiteres über die einbasischen Säuren und ihre Abkömmlinge siehe im speziellen Teil.

2. Gesättigte zweibasische Säuren. Die gesättigten zweibasischen Säuren enthalten zwei Carboxylgruppen. Ihre allgemeine Formel lautet $C_nH_{2n-2}O_4$. Eine Ausnahme bildet nur die Kohlensäure $CO\!\begin{matrix} /OH \\ \backslash OH \end{matrix}$ mit nur einer Carboxylgruppe. Als Oxyameisensäure ist sie eigentlich eine zweiwertige einbasische Säure; sie verhält sich aber vollständig wie eine zweibasische Säure (vgl. den Artikel „Kohlenstoff").

2a) Vorkommen. Manche zweibasische Säuren kommen in der Natur vor; so findet sich z. B. Oxalsäure $\begin{matrix} COOH \\ | \\ COOH \end{matrix}$ in vielen Pflanzen,

auch in Harnsedimenten und Blasensteinen.

Bernsteinsäure $\begin{array}{l} CH_2-COOH \\ | \\ CH_2-COOH \end{array}$ kommt nicht nur im Bernstein und anderen Harzen, sondern auch in unreifen Weintrauben, zuweilen auch im Blut und Harn vor; ferner ist sie ein ständiges Nebenprodukt der alkoholischen Gärung.

2b) Darstellung. Zweibasische Säuren entstehen bei der Oxydation vieler organischer Stoffe, vor allem von mehrwertigen primären Alkoholen und vielen Kohlehydraten; durch Hydrolyse von Cyanfettsäuren oder von Dinitrilen; aus Jod- oder Bromfettsäuren durch Behandlung mit Silberpulver.

Die Homologen der Malonsäure

$$CH_2\begin{cases} COOH \\ COOH \end{cases}$$

erhält man durch die sogenannte Malonestersynthese und durch die ähnlich verlaufende Acetessigestersynthese (vgl. dazu den speziellen Teil und den Artikel „Ester".)

Bei der Elektrolyse von Alkalisalzen von sauren Estern zweibasischer Säuren spaltet das Anion Kohlendioxyd ab und zwei so entstehende Reste vereinigen sich zu einer neuen zweibasischen Säure von höherem Molekulargewicht

$$CH_2\begin{cases} COOK \\ COOC_2H_5 \end{cases} = CH_2\begin{cases} COO' \\ COOC_2H_5 \end{cases} + K^{\cdot}$$

$$2\,CH_2\begin{cases} COO' \\ COOC_2H_5 \end{cases} = \begin{array}{l} CH_2-COOC_2H_5 \\ | \\ CH_2-COOC_2H_5 \end{array} + 2CO_2$$

2c) Verhalten. Die gesättigten zweibasischen Säuren sind alle fest und kristallisierbar. Der Schmelzpunkt steigt mit wachsender Kohlenstoffzahl. Ebenso wie die einbasischen besitzen aber auch die zweibasischen Säuren mit unverzweigter Kohlenstoffkette bei einer geraden Anzahl von Kohlenstoffatomen einen höheren Schmelzpunkt als die nächsthöheren Glieder mit einer ungeraden Kohlenstoffzahl.

Die niederen Glieder dieser Reihe sind in Wasser leicht löslich. Mit steigender Zahl der Kohlenstoffatome nimmt die Löslichkeit ab. Die Säuren mit ungerader Kohlenstoffzahl sind jedoch stets viel leichter löslich als die nächst vorhergehenden mit gerader Kohlenstoffzahl.

Bezüglich ihrer chemischen Eigenschaften ist außer den allgemeinen Säurereaktionen besonders das Verhalten beim Erhitzen bemerkenswert. Oxalsäure zerfällt dabei in Kohlendioxyd, Kohlenmonoxyd und Wasser

$$\begin{array}{l} COOH \\ | \\ COOH \end{array} = CO_2 + CO + H_2O.$$

Malonsäure und die homologen Malonsäuren, d. h. alle Säuren, bei denen die beiden Carboxylgruppen an dasselbe Kohlenstoffatom gebunden sind, spalten beim Erhitzen Kohlendioxyd ab unter Bildung einer einbasischen Säure

$$CH_2\begin{cases} COOH \\ COOH \end{cases} = CH_3-COOH + CO_2.$$

Bernsteinsäure und Glutarsäure geben dagegen beim Erhitzen Wasser ab unter Bildung ihrer Anhydride

$$\begin{array}{l} CH_2-COOH \\ | \\ CH_2-COOH \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} CH_2-CO \\ | \\ CH_2-CO \end{array}\!\!>O;$$

$$CH_2\begin{cases} CH_2-COOH \\ CH_2-COOH \end{cases} \longrightarrow CH_2\begin{cases} CH_2-CO \\ CH_2-CO \end{cases}\!\!>O.$$

Die Homologen dieser Säuren verhalten sich ebenso, sofern bei der Anhydridbildung ein fünf- oder sechsgliedriger Ring gebildet wird.

3. **Ungesättigte zweibasische Säuren.** Den ungesättigten zweibasischen Säuren mit einer Doppelbindung kommt die allgemeine Formel $C_nH_{2n-1}O_4$ zu. Ebenso wie die ungesättigten einbasischen Säuren kommen auch sie in zwei stereoisomeren Formen vor, z. B.

$$\begin{array}{l} H-C-COOH \\ \quad \Vert \\ H-C-COOH \end{array} \qquad \begin{array}{l} COOH-C-H \\ \qquad\quad \Vert \\ \quad H-C-COOH \end{array}$$

Maleinsäure Fumarsäure

Die Konfiguration dieser Säuren ergibt sich aus ihrem Verhalten beim Erhitzen; die Maleinsäure bildet ein Anhydrid, die Fumarsäure nicht. Ueber diese als cis-trans- oder Aethylenisomerie bezeichnete Erscheinung vgl. den Artikel „Isomerie".

Ungesättigte zweibasische Säuren erhält man durch Abspaltung von Halogenwasserstoff aus den Halogenderivaten der entsprechenden gesättigten Säuren oder durch Abspaltung von Wasser aus den entsprechenden Oxysäuren (vgl. dazu den speziellen Teil).

4. **Substituierte zweibasische Säuren.** Von substituierten zweibasischen Säuren sind Amino- und Oxysäuren in der Natur sehr verbreitet. Asparaginsäure (Aminobernsteinsäure) $\begin{array}{l} \overset{*}{C}H(NH_2)-COOH \\ | \\ CH_2-COOH \end{array}$ ist ein Spaltungsprodukt der Eiweißstoffe; ihr Monamid, das Asparagin $\begin{array}{l} \overset{*}{C}H(NH_2)-COOH \\ | \\ CH_2-CONH_2 \end{array}$

kommt besonders häufig in keimenden Pflanzen vor. Aepfelsäure (Oxybernsteinsäure)

$$\begin{array}{l}\overset{*}{C}H(OH)\text{—}COOH \\ | \\ CH_2\text{—}COOH\end{array}$$

und Weinsäure (Dioxybernsteinsäure)

$$\begin{array}{l}\overset{*}{C}H(OH)\text{—}COOH \\ | \\ \underset{*}{C}H(OH)\text{—}COOH\end{array}$$

finden sich namentlich in vielen unreifen Früchten.

Ueber die durch das Vorhandensein von einem asymmetrischen Kohlenstoffatom (*) in der Asparaginsäure und Aepfelsäure und von zwei solchen in der Weinsäure bedingten Isomerien vgl. die Artikel „Isomerie" und „Drehung der Polarisationsebene".

Von den mehr als zweibasischen Säuren der Fettreihe sei hier nur die in den Zitronen vorkommende Zitronensäure

$$\begin{array}{l}CH_2\text{—}HOOH \\ | \\ CH(OH)\text{—}COOH \\ | \\ CH_2\text{—}COOH\end{array}$$

erwähnt (das weitere siehe im speziellen Teil).

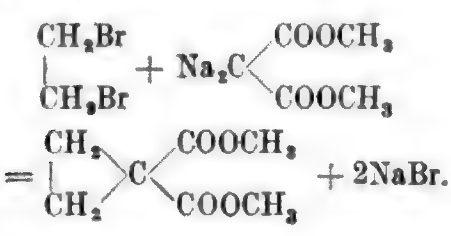
C. Cyklische Säuren.

Die cyklischen Säuren enthalten einen geschlossenen Ring, der bei den isocyklischen Säuren nur aus Kohlenstoffatomen, bei den heterocyklischen daneben auch noch aus anderen Elementen besteht.

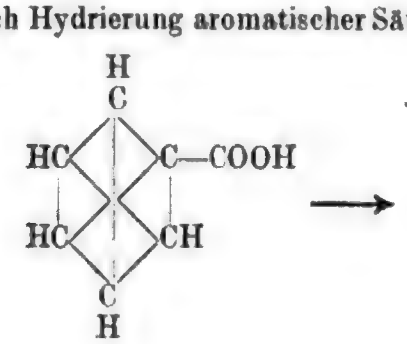
1. Isocyklische Säuren. Die isocyklischen Säuren kann man in aromatische und hydroaromatische einteilen.

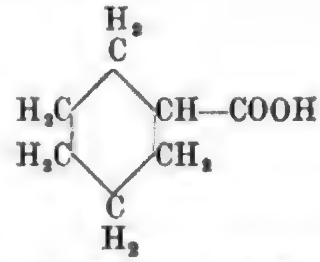
1a) Hydroaromatische Säuren. Die hydroaromatischen Säuren gewinnt man

α) durch Ringschließung aus Verbindungen mit offener Kette, z. B.

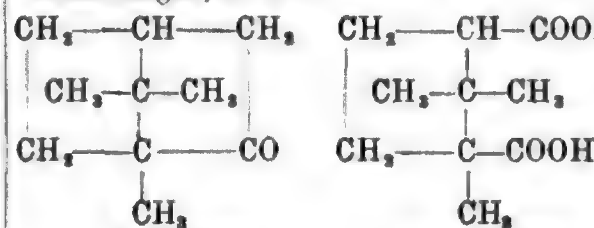


β) durch Hydrierung aromatischer Säuren



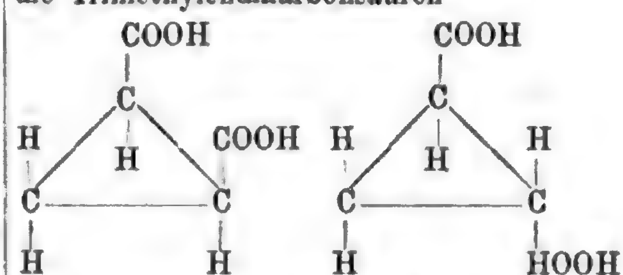


γ) durch Oxydation hydroaromatischer Verbindungen, z. B.



Kampfer　　　　Kampfersäure

Die mehrbasischen hydroaromatischen Säuren, deren Carboxylgruppen an verschiedene Kohlenstoffatome gebunden sind, treten in zwei stereoisomeren Formen auf, z. B. die Trimethylendikarbonsäuren

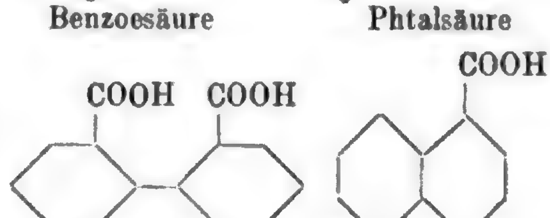


und die Hydrophtalsäuren (vgl. den Artikel „Isomerie"). Weiteres über die Eigenschaften der hydroaromatischen Säuren s. im Artikel „Terpene".

1b) Aromatische Säuren. Die aromatischen Säuren enthalten einen oder mehrere einfache oder kondensierte Benzolkerne, z. B.



Benzoesäure　　　　Phtalsäure



Diphensäure　　　　Naphtoesäure

α) Vorkommen. Einige aromatische Säuren kommen in der Natur vor, z. B. Benzoesäure frei in der Benzoe und an Glykokoll gebunden als Hippursäure C_6H_5—CO—NH—CH_2—COOH im Harn vieler Pflanzenfresser; Zimtsäure C_6H_5—CH=CH—COOH findet sich in manchen Balsamen und Harzen. Von natürlich

vorkommenden Oxysäuren seien die in ätherischen Oelen, sowie in der Weidenrinde vorkommende Salicylsäure (Oxybenzoesäure) $C_6H_4\left\langle\begin{matrix}OH\\COOH\end{matrix}\right.$ und die zu den im Pflanzenreich weit verbreiteten Gerbstoffen in naher Beziehung stehende Gallussäure (Trioxybenzoesäure) $C_6H_2(OH)_3$—COOH erwähnt (vgl. auch den Artikel „Tinte"). Aromatische Aminosäuren finden sich unter den Spaltungsprodukten der Eiweißstoffe (s. den Artikel „Eiweißstoffe").

β) Darstellung. Die aromatischen Säuren werden nach den schon früher angeführten allgemeinen Darstellungsmethoden von Carbonsäuren gewonnen. Besonders häufig wird hierzu die Oxydation von Kohlenwasserstoffen oder die Hydrolyse von Nitrilen angewandt.

γ) Verhalten. Soweit es sich um Reaktionen der Carboxylgruppe handelt, verhalten sich die aromatischen Säuren genau wie die aliphatischen. Im übrigen zeigen sie alle Isomerien und Reaktionen der aromatischen Verbindungen, d. h. sie lassen sich chlorieren, nitrieren, sulfurieren usw.

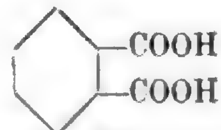
Sind neben der Carboxylgruppe noch andere Seitenketten vorhanden, so können die Substituenten natürlich auch in diese eintreten. Man muß daher z. B. bei den Oxysäuren unterscheiden zwischen Phenolcarbonsäuren, bei denen die Hydroxylgruppe an den Benzolkern gebunden ist wie in der Salicylsäure $C_6H_4\left\langle\begin{matrix}OH\\COOH\end{matrix}\right.$, und Alkoholsäuren, bei denen sich die Hydroxylgruppe in der Seitenkette befindet wie in der Mandelsäure $C_6H_5CH\left\langle\begin{matrix}OH\\COOH\end{matrix}\right.$. Die Gesetze der Lacton- und Lactambildung gelten auch für die aromatischen Oxy- und Aminosäuren. So ist z. B. das in der Natur vorkommende Cumarin $C_6H_4\left\langle\begin{matrix}O—CO\\CH=CH\end{matrix}\right.$ das Lacton der ortho-Oxyzimtsäure.

Die ungesättigten aromatischen Säuren, z. B. die Zimtsäuren, zeigen ähnliche Isomerien wie die ungesättigten aliphatischen Säuren (vgl. den Artikel „Isomerie")

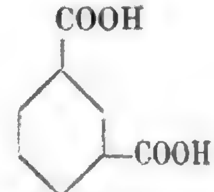
$$\begin{matrix}C_6H_5—C—H\\ \|\\ H—C—COOH\end{matrix}\qquad\begin{matrix}H—C—C_6H_5\\ \|\\ H—C—COOH\end{matrix}$$

Eine ungesättigte aromatische Säure mit einer dreifachen Bindung ist z. B. die Phenylpropiolsäure C_6H_5—C≡C—COOH, deren Nitroderivat zur künstlichen Darstellung von Indigo verwendet wird.

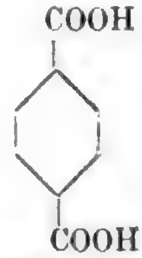
Zweibasische aromatische Säuren sind z. B. die Phtalsäuren



ortho-Phtalsäure



Isophtalsäure

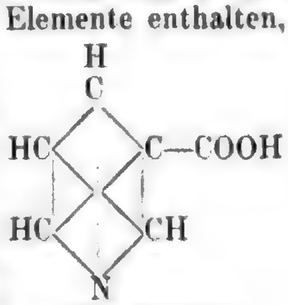


Terephtalsäure.

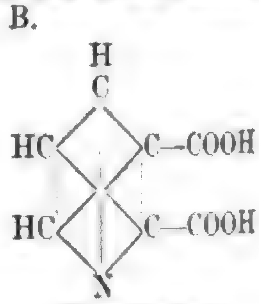
Von diesen bildet nur die ortho-Phtalsäure beim Erhitzen ein Anhydrid.

Eine sechsbasische Säure ist die Mellitsäure (Benzolhexacarbonsäure) $C_6(COOH)_6$, deren Aluminiumsalz zuweilen in Braunkohlenlagern vorkommt (Honigstein). Sie entsteht u. a. auch bei der Oxydation von Graphit.

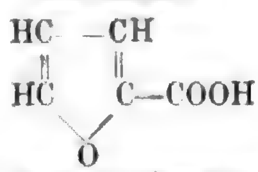
2. Heterocyklische Säuren. Die heterozyklischen Säuren verhalten sich als Säuren genau wie die aromatischen, von denen sie sich ja nur dadurch unterscheiden, daß sie in ihrem Kern außer Kohlenstoff noch andere Elemente enthalten, z. B.



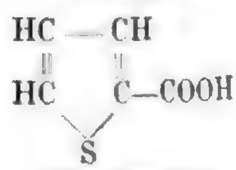
Nikotinsäure



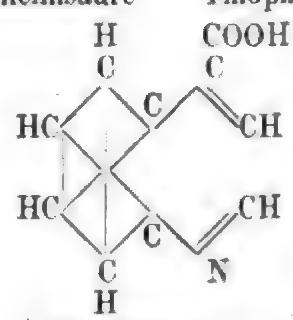
Chinolinsäure



Brenzschleimsäure



Thiophensäure



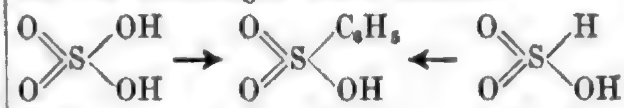
Cinchoninsäure.

Viele von ihnen werden durch Oxydation von Alkaloiden gewonnen. Soweit es sich um die Erzeugung der Carboxylgruppe handelt, gelten auch für sie die früher angegebenen Darstellungsmethoden. Ueber den

Aufbau der ihnen zugrunde liegenden Ringsysteme vgl. den Artikel „Heterozyklische Verbindungen".

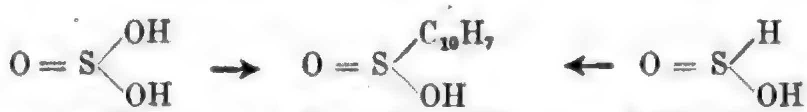
III. Nichtcarbonsäuren.

Außer den Carbonsäuren gibt es noch eine Anzahl organischer Säuren, deren saurer Charakter durch eine kohlenstofffreie Gruppe bedingt ist. Diese Säuren leiten sich von anorganischen Säuren ab und zwar in der Weise, daß man entweder eine Hydroxylgruppe in einer sauerstoffreicheren oder ein Wasserstoffatom in einer sauerstoffärmeren anorganischen Säure durch einen organischen Rest ersetzt. So lassen sich z. B. die Sulfosäuren sowohl von der Schwefelsäure wie von der schwefligen Säure ableiten



Schwefelsäure — Benzolsulfosäure — schweflige Säure

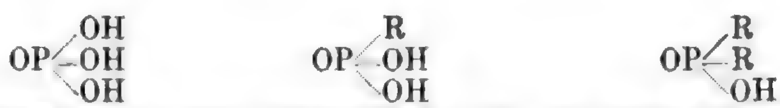
Die Sulfinsäure kann man sowohl von der (symmetrischen Formel der) schwefligen Säure wie von der als solcher noch unbekannten Sulfoxylsäure ableiten



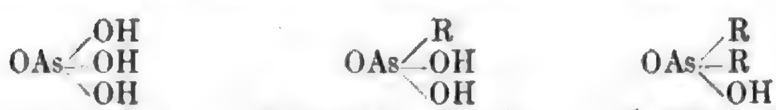
schweflige Säure — Naphtalinsulfinsäure — Sulfoxylsäure

Ganz entsprechende Säuren kennt man auch vom Selen und Tellur.

In ähnlicher Weise erhält man die Formeln der Phosphin- und Arsinsäuren (R = organischer Rest)



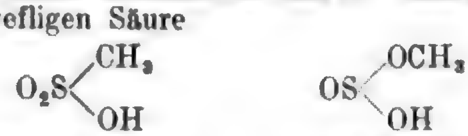
Phosphorsäure — Monoalkyl(aryl)phosphinsäuren (Phosphosäuren) — Dialkyl(aryl)phosphinsäuren



Arsensäure — Monoalkyl(aryl)arsinsäuren (Arsonsäuren) — Dialkyl(aryl)arsinsäuren

Ganz ebenso erhält man aus der Borsäure die Aethylborsäure $B\begin{matrix}C_2H_5\\OH\\OH\end{matrix}$.

In allen diesen Säuren ist das säurebildende Element unmittelbar an Kohlenstoff gebunden, von dem es sich nur schwer wieder trennen läßt. Es geht dies u. a. auch daraus hervor, daß die organischen Wasserstoffverbindungen dieser Elemente, in denen diese an Kohlenstoff gebunden sein müssen, bei der Oxydation derartige Säuren liefern. So erhält man aus Merkaptanen Sulfosäuren, aus Phosphinen Phosphinsäuren usw. Die große Beständigkeit zeigt sich z. B. im Verhalten der Sulfosäuren im Gegensatz zu den mit ihnen metameren sauren Estern der schwefligen Säure



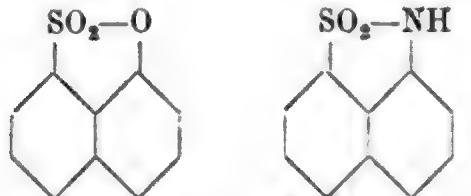
Methylsulfosäure — Schwefligsäuremethylester.

Die letzteren lassen sich leicht hydrolytisch spalten, während die Sulfosäuren nicht spaltbar sind.

Die bei weitem wichtigsten unter diesen Säuren sind die Sulfo- und Sulfinsäuren. Ueber deren Darstellung und Verhalten vgl. den Artikel „Sulfoverbindungen". In neuerer Zeit haben auch die Arsinsäuren als Ausgangsmaterial für wichtige Arzneimittel Bedeutung gewonnen; so ist z. B. Atoxyl das Natriumsalz der p-Aminophenylarsinsäure

$$OAs\begin{matrix}C_6H_4NH_2\\OH\\OH\end{matrix}$$

Die Oxy- und Aminosulfosäuren bilden bei geeigneter Stellung der Substituenten den Lactonen und Lactamen entsprechende innere Ester und Amide, die als Sultone und Sultame bezeichnet werden, z. B.



Naphtsulton Naphtsultam.

Vgl. auch die Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und der Nichtmetalle" u. „Chemische Typen").

IV. Organische Persäuren.

In der organischen Chemie sind Persäuren bisher nur von Carbonsäuren bekannt. Sie sind durch die Gruppe $-C\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow O-OH\end{matrix}$ gekennzeichnet. Man erhält sie entweder durch Hydrolyse organischer Peroxyde (vgl. den Artikel Oxyde) oder durch Einwirkung von konzentriertem Wasserstoffsuperoxyd auf die freien Säuren oder deren Anhydride

$$\begin{matrix}CH_3-CO-O\\ CH_3-CO\end{matrix}\!\!>\!O + H_2O = CH_3-C\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow O-OH\end{matrix}$$

Acetperoxyd Peressigsäure

$+ CH_3-COOH$ Essigsäure.

$$CH_3-COOH + H_2O_2 = CH_3-CO-O-OH + H_2O$$

$$\begin{matrix}CH_3-CO\\ CH_3-CO\end{matrix}\!\!>\!O + H_2O_2 = CH_3-CO-O-OH + CH_3-COOH$$

Die bisher bekannten Persäuren der Fettsäurereihe sind leichtzersetzliche und daher stark oxydierend wirkende Flüssigkeiten. Mit wachsender Länge des organischen Restes nimmt die Beständigkeit etwas zu. Auch zweibasische, sowie ungesättigte organische Persäuren sind dargestellt worden, z. T. allerdings nur in wässeriger Lösung. Von aromatischen Säuren sind Perbenzoesäure und Perphtalsäuren bekannt. Eine hydroaromatische Persäure ist die Perkampfersäure.

V. Pseudosäuren.

Die fetten und fettaromatischen Nitroverbindungen, z. B. Phenylnitromethan, kommen in zwei isomeren Formen vor. Die eine davon hat die Formel $C_6H_5-CH=N\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow OH.\end{matrix}$ Sie ist eine wirkliche Säure, die aber nur in Form ihrer Salze beständig ist. Wird sie daraus frei gemacht, so geht sie mehr oder weniger schnell in die isomere Form $C_6H_5-CH_2-NO_2$ über. Diese vermag als solche keine Salze zu bilden, vereinigt sich aber mit Alkalien allmählich zu Salzen von der ersten Formel. Derartige Verbindungen die an sich völlig neutral sind, aber unter Umlagerung mit Alkalien Salze bilden können, nennt man nach Hantzsch Pseudosäuren.

Literatur. *F. Beilstein, Handbuch der organischen Chemie, 3. Aufl. Hamburg und Leipzig 1893.* — *A. M. Clover und G. F. Richmond, The Hydrolysis of organic Peroxides and Peracids. Amer. Chem. Journ.* **29**, *179, 1903.* — *J. d'Ans und W. Frey, Direkte Darstellung organischer Persäuren. Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **45**, *1845, 1912.* — *A. Hantzsch, Zur Konstitutionsbestimmung von Körpern mit labilen Atomgruppen. Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **32**, *575, 1899.* — *F. Henrich, Theorien der organischen Chemie. Braunschweig 1912.*

W. Meigen.

II. Spezieller Teil.

A. Anorganische Säuren.

Die Beschreibung der anorganischen Säuren erfolgt in den Artikeln über die einzelnen Elemente (siehe also z. B. Fluorgruppe, Sauerstoffgruppe usw.; vgl. auch den Artikel „Chemische Typen").

B. Organische Säuren.

1. Definition. 2. Ableitung der Carboxylformel. 3. Mögliche Isomerien. 4. Einteilung der Säuren. 5. Nomenklatur. 6. Bildungsweisen. 7. Aufklärung der Konstitution unbekannter Säuren. 8. Chemisches Verhalten. 9. Allgemeine physikalische Eigenschaften. 10. Kurze Zusammenfassung der Reaktionen der Säuren. 11. Säurederivate: I. Stammsubstituierte Monocarbonsäuren: Zyklische, ungesättigte, mehrbasische, Halogen-, Sauerstoff-, Stickstoffsubstituierte Säuren. II. Derivate mit umgebildeter Carboxylgruppe: Halogenide, Anhydride, Persäuren, Peroxyde, Salze. III. Stammsubstituierte Säuren mit gleichzeitig umgebildeter Carboxylgruppe. 12. Beschreibung einzelner wichtiger Säuren.

1. Definition. Als organische Säuren[1]) im engeren Sinne oder Carbonsäuren werden bezeichnet OH-Verbindungen des Kohlenstoffs, deren aus Analyse und Molekulargewichtbestimmung ermittelte Zusammensetzung durch die allgemeine Bruttoformel $C_xH_{2y-2n}O_{2n}$, deren Bildungen und Umsetzungen aber durch die rationelle Formel $R(COOH)_x$ veranschaulicht werden können, d. h. die ein oder mehrere einwertige „Carboxyl"gruppen $\left(-C\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow OH\end{matrix}\right)$ an einen be-

[1]) Die Allgemeindefinition des Begriffs Säure siehe im allgemeinen Teil des Artikels.

liebigen organischen Rest[1]) gebunden enthalten. — Zahlreiche, zum Teil sehr bekannte wichtige organische Verbindungen tragen ausgeprägten Säurecharakter ohne eine solche Carboxylgruppe zu enthalten (Harnsäure, Pikrinsäure, Carbolsäure u. a.). Diese organischen Säuren im weiteren Sinne, denen allen der bewegliche, ionisierbare, durch Metalle ersetzbare Wasserstoff gemeinsam ist, werden an anderer Stelle besprochen. Ueber Pseudosäuren vgl. den Artitel „Isomerie".

Bezeichnet man die Formel irgendeines Kohlenwasserstoffs — da die Zahl der H-Atome immer, mit verschwindenden Ausnahmen, gerad ist — als C_xH_{2y}, so sind die Formeln der einfachen, nicht anderweitig substituierten Säuren[2]) ausdrückbar durch das Schema $C_xH_{2y-2n}O_{2n}$. Geht man nämlich auch bei den Säuren wieder, wie bei den Kohlenwasserstoffen (vgl. den Artikel „Aliphatische Kohlenwasserstoffe"), aus von den wasserstoffreichsten Verbindungen, so unterscheiden sich deren nach Analyse und Molekulargewicht ermittelte Bruttoformeln

CH_2O_2 Ameisensäure	$C_2H_4O_2$ Essigsäure	$C_3H_6O_2$ Propionsäure	$C_4H_8O_2$ Buttersäure	(1-basische Säuren)
	$C_2H_2O_4$ Oxalsäure	$C_3H_4O_4$ Malonsäure	$C_4H_6O_4$ Bernsteinsäure	(2-basische Säuren
			$C_4H_4O_6$ usw.	(3-basische Säuren)

von denen des H-reichsten Kohlenwasserstoffs, zu dem sie in genetischer Beziehung stehen, nämlich

CH_4 Methan	C_2H_6 Aethan	C_3H_8 Propan	C_4H_{10} Butan

dadurch, daß sie an Stelle je zweier Wasserstoff-, zwei Sauerstoffatome enthalten. In analoger Weise existieren den Kohlenwasserstoffen C_nH_{2n} entsprechende Säuren $C_nH_{2n-2}O_2$; $C_nH_{2n-4}O_4$ usf.; den Kohlenwasserstoffen C_nH_{2n-2} entsprechende Säuren $C_nH_{2n-4}O_2$ usw.; oder allgemein gesprochen: durch Ersatz je zweier H-Atome in einer Kohlenwasserstoffformel durch 2 O-Atome gelangt man zu Säureformeln: $C_xH_{2y-2n}O_{2n}$. — Nur aus den niedersten Kohlenwasserstoffen jeder Reihe (z. B. bei Enen C_2H_4, Inen C_2H_2, Diënen C_3H_4, C_4H_6 usf.) erhält man auf diese Weise keine Säuren. Alle solche Kohlenwasserstoffe haben das Gemeinsame, daß sie keine CH_3-Gruppen enthalten. Die Zahl der CH_3-Gruppen eines Kohlenwasserstoffs gibt zugleich auch die Höchstzahl der aus ihm ohne Aenderung des Sättigungszustandes und der C-Atomzahl ableitbaren Säuren an.

Die Wahl der Konstitutionsformel $R(COOH)_x$ wird bestimmt zunächst durch die allgemeinen Vorstellungen über Valenz und Atomverkettung, nämlich die als 4 und 2-Wertigkeit bezeichnete Eigenschaft des C-Atoms 4, des O-Atoms 2 Atome Wasserstoff zu binden, und durch die an anderer Stelle über Atomverkettung und über einfache und doppelte Bindung entwickelten Vorstellungen (vgl. den Artikel „Valenzlehre"). Vor allem aber durch das bei Bildungen und Umsetzungen zu Tage tretende allgemein chemische Verhalten der Verbindungen, wobei die Annahme gemacht wird, daß bei Umsetzungen, Kondensationen, Spaltungen usw. die Verkettungsart (Konstitution) der Atome im allgemeinen, abgesehen von den an der Reaktion teilnehmenden wenigen Bindungen unverändert bleibt (so daß „Umlagerungen" nur ausnahmsweise stattfinden). Schon aus den allgemeinen Vorstellungen, ohne Heranziehung der aus Synthese und Umsetzungen sich ergebenden strukturell-konstitutiven Beziehungen läßt sich ableiten, daß eine andere als die gewählte Carboxylformel nicht in Betracht kommen kann für Verbindungen, die zwei Sauerstoffatome an Stelle von 2 Wasserstoffatomen im Kohlenwasserstoff enthalten.

Ohne Heranziehung struktureller Vorstellungen stellt sich der Eintritt eines Sauerstoffatoms in die Formel eines Kohlenwasserstoffs dar, entweder

a) als Addition, d. h. er geschieht ohne Aenderung der Wasserstoffzahl: $CH \longrightarrow COH$,
z. B. CH_4 Methan $\longrightarrow$ CH_4O Methylalkohol
C_2H_6 Aethan $\longrightarrow$ C_2H_6O Aethylalkohol und Methyläther

b) als Substitution, so daß an Stelle von 2H- ein O-Atom tritt: $CH_2 \longrightarrow CO$;
z. B. C_3H_8 Propan $\longrightarrow$ C_3H_6O Aceton
C_2H_6 Aethan $\longrightarrow$ C_2H_4O Aethylenoxyd.

[1]) Bei der Ameisensäure an Wasserstoff, bei Kohlensäure an OH, bei Carbaminsäure an NH$_2$.

[2]) Ueber Säuren, die außer im Carboxyl noch weiteren Sauerstoff enthalten in Form von Alkohol-, Keton- u. dgl. Gruppen vgl. S. 802ff.

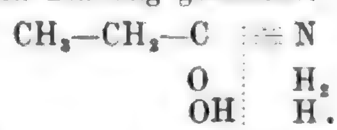
Der wie bei den Säuren an Stelle von 2 H im Molekül des Kohlenwasserstoffs erfolgende Eintritt **zweier** Sauerstoffatome könnte danach nur entweder als eine Substitution von zwei einwertigen H durch ein zweiwertiges O_2 (= —O—O— oder = O:O) oder als eine gleichzeitige Addition und Substitution im obigen Sinne aufgefaßt werden, d. h. die Säuren müßten die Gruppe CO neben COH, d. h. die Keton- neben der Alkoholgruppe, oder schließlich die Gruppe COOH (Carboxyl) enthalten. Die erste Möglichkeit fällt außer Betracht, da die Konfiguration —O—O— Formelsymbol für eine leicht zerfallende Bindung (Superoxyde) ist, den Säuren aber die stark oxydierenden Eigenschaften dieser Körperklasse fehlen. — Aber auch die zweite Möglichkeit scheidet aus. Den Gruppen CO und COH kommen bestimmte Eigenschaften zu, die wir von Ketonen und Alkoholen her kennen, und die auch bei gleichzeitigem Vorkommen im Molekül, wie bei den Ketonalkoholen, sich nicht wesentlich ändern. Die Säuren dagegen zeigen ganz individuelle, typische „Säurereaktionen“, die mit denen der Alkohole wenig, mit denen der Ketone noch viel weniger Aehnlichkeit haben. Bei der Formulierung mit der Carboxylgruppe $C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup O}{\diagdown OH}$ erscheint die CO-Gruppe in natürlicher Weise beeinflußbar durch das OH, die COH-Gruppe umgekehrt durch den doppelt gebundenen Sauerstoff am gleichen C-Atom. Durch das gewählte Formelbild werden also Eigenschaften einer Körperklasse gut zum Ausdruck gebracht werden, die noch gewisse entfernte Aehnlichkeiten zeigt mit Verbindungen, denen wir die CO- und COH-Gruppe zuerteilen, die im wesentlichen aber ganz eigenes Verhalten hat, das sich durch die gegenseitige Beeinflussung der Bestandteile erklärt (vgl. S. 780ff).

2. Ableitung der Carboxylformel: aus Synthesen, Zersetzungen und allgemeinem chemischen Verhalten.

Zunächst ist die Tatsache, daß bei den einfachen Säuren auf je 2 Atome Sauerstoff immer 1 „typisches“, durch Metalle ersetzbares H-Atom vorhanden ist, Anlaß, die Besonderheit dieses H-Atoms in einer besonderen Bindungsart zum Ausdruck zu bringen, nämlich durch die Bindung an O, wie in Wasser und Alkohol (C—O—H).[1] Die ausschließliche Möglichkeit Säuren aus solchen Kohlenwasserstoffen derselben C-Atomzahl und derselben Reihe, d. h. ohne Aenderung ihres Sättigungszustandes, abzuleiten, die eine primäre, oder CH_3-Gruppe enthalten, spricht weiter für Auffassung der Säuren als Verbindungen mit einem trisubstituierten C-Atom. Entscheidend für die Formulierung sind schließlich 3 Bildungsweisen der Säuren, nämlich

1. die durch Verseifung der Cyanide oder Nitrile,
2. die durch Oxydation primärer Alkohole,
3. die durch Addition von CO und CO_2 an metallsubstituierte organische Verbindungen.

Für Jodäthyl ist die Formel $CH_3{-}CH_2J$ festgelegt; mit Cyankalium gewinnt man daraus Aethylcyanid C_3H_5N, das bei Verseifung mit Säure das zugehörige Ammonsalz und Propionsäure $C_3H_6O_2$ liefert. Ebendieselbe Säure entsteht nun auch durch Oxydation des primären Propylalkohols C_3H_8O (= $CH_3CH_2CH_2OH$). Nehmen wir an, daß wie gewöhnlich die Oxydation dort weiter fortschreitet, wo sie bereits begonnen, d. h. amselben C-Atom, so gelangen wir zur Formel $CH_3CH_2CO_2H$ und im Einklang damit wird sich das bei der Verseifung diese Säure liefernde Cyanid zweckmäßig formulieren lassen als $CH_3{-}CH_2{-}C{\equiv}N$, wobei, ebenfalls im Einklang mit allgemeinen Vorstellungen, die verseifende Addition der Bestandteile des Wassers an der Stelle der mehrfachen Bindung geschieht:



Auch die weitere Bildungsmöglichkeit der Säuren in Form ihrer Salze durch Addition von CO an Alkoholat oder von CO_2 an Metallalkyle[1]) führt ebenso wie die vorigen zur Carboxylformel

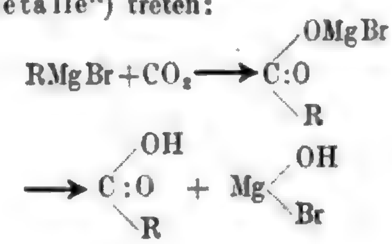
$$RCH_2ONa + CO \longrightarrow RCH_2C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup O}{\diagdown ONa}$$

$$RCH_2Na + CO_2 \longrightarrow RCH_2C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup O}{\diagdown ONa}$$

$$C_6H_5Br + 2Na + CO_2 \longrightarrow C_6H_5COONa + NaBr$$

[1]) Im Unterschied davon zeigt Metall, das an C gebundenes H ersetzt, wie bei den Acetylenen, davon ganz verschiedene Eigenschaften (z. B. Explosivität).

[1]) An Stelle von CO_2 kann $COCl_2$ eingelagert werden, das dann mit verseifenden Mitteln Cl gegen OH austauscht. An Stelle der Metallalkyle können die **Grignardschen** Alkylmagnesiumhaloide (vgl. den Artikel „**Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle**“) treten:



($C_6H_5Br + Na$ wirkt dabei wie das nicht existenzfähige C_6H_5Na)

$$CH_3C \equiv CNa + CO_2 \longrightarrow CH_3C \equiv C.COONa$$
(tetrolsaures Na)

Daß die Atomkette O—C—O in der Säure unverändert vorhanden ist, dafür spricht auch die leichte Abspaltbarkeit von CO_2 aus vielen Säuren (Umkehrung der Bildungsgleichung):

$$O = C = O + RH \rightleftarrows O = \underset{|}{C} - O + \underset{R}{\overset{|}{H}} \rightleftarrows O = \underset{\underset{R}{|}}{C} - OH$$

Je nach den Beziehungen, die man betonen will, kann man das Säuremolekül auffassen:

1. als Derivat eines Kohlenwasserstoffs, nämlich
   a) als Kohlenwasserstoff, in dem ein Wasserstoffatom durch die Carboxylgruppe ersetzt ist oder
   b) als Verbindung von Kohlenwasserstoffradikal mit Carboxyl,
   c) als Produkt der Einlagerung von CO_2 in einen Kohlenwasserstoff,
   d) als Endprodukt der Oxydation der CH_3-Gruppe eines Kohlenwasserstoffs;
2. als primären Alkohol, in dem H_2 der typischen Gruppe durch O ersetzt ist (Oxydationsprodukt der primären Alkohole) oder als Produkt der Einlagerung von CO in einen primären Alkohol;
3. als Aldehyd, in dem das typische H-Atom zu OH oxydiert ist;
4. als Kohlensäure- oder Ameisensäurederivat entsprechend den Formeln:

$$C \begin{cases} OH \\ O \\ OH \end{cases} \qquad C \begin{cases} H \\ O \\ OH \end{cases} \qquad C \begin{cases} R \\ O \\ OH \end{cases}$$

5. als Wasser, in dem ein Wasserstoffatom durch einen Acylrest ersetzt ist:

$$O \begin{cases} H \\ H \end{cases} \qquad O \begin{cases} COR \\ H \end{cases}$$

3. Mögliche Isomerien. Ihre Zahl berechnet sich am einfachsten bei Zugrundelegung der ersten der oben gegebenen Auffassungen (1a).

Bei den Monocarbonsäuren und ihren im Abschnitt 11 erörterten Derivaten (Säurechloride usw.) ist sie danach ebenso groß wie die aller sonstigen möglichen Monoderivate des um ein C-Atom ärmeren Kohlenwasserstoffs. Außerdem kommen natürlich hinzu alle Isomerien, die der Kohlenwasserstoff selbst zeigen kann.

Bei Di-, Tri- usw. Derivaten, z. B. den mehrwertigen Säuren, kommen hinzu jene Isomerien, die sich aus der Stellung der beiden Substituenten gegeneinander ergeben (α-, β-, γ-Stellung).

Es ist zu bemerken, daß die Zahl der bekannten hochwertigen Derivate, z. B. der Polycarbonsäuren nicht allzu groß ist (die höchstbekannte Zahl von Carboxylgruppen im Molekül beträgt 14) und daß namentlich ein Widerstand besteht gegen die Anhäufung mehrerer COOH-Gruppen (wie ja überhaupt mehrerer negativer Gruppen) an einem C-Atom, derart, daß z. B. schon die Malonsäure

$$\begin{matrix} COOH \\ | \\ CH_2 \\ | \\ COOH \end{matrix}$$

leicht CO_2 abspaltet.

4. Einteilung der Säuren. Man kann von Säuren unterscheiden:

1. nach der Zahl der Carboxylgruppen 1-, 2-, 3- usw. basische;[1])
2. nach der Art der carboxylierten Gruppe
   primäre RCH_2COOH
   sekundäre $R_2{=}CHCOOH$
   tertiäre $R_3{\equiv}C{-}COOH$;
3. nach der Art des mit COOH verbundenen Kohlenwasserstoffradikals gesättigte und ungesättigte, doppelt ungesättigte (an-, en-, in-, diën-Säuren), aromatische usw.; ferner Halogen-, Oxy-, Amido- usw. Säuren.

Je nach der Stellung zum Carboxyl spricht man von α-Oxysäuren, z. B. RCHOHCOOH, $\beta\gamma$-ungesättigten Säuren ($\Delta\beta\gamma$-Säuren), z. B. $R\overset{\gamma}{C}H = \overset{\beta}{C}H - \overset{\alpha}{C}H_2 - COOH$ usw.

Nach einer früher gebräuchlichen Ausdruckweise zählt man bei Oxysäuren die Gesamtsumme der an Sauerstoff gebundenen

---

[1]) Aus der Titration berechnet man die 40 g = 1 g-Mol. NaOH äquivalente Menge, d. h. das Aequivalentgewicht der Säure.

Dieses erweist sich als gleich dem Mol.-Gewicht, d. h. die Säure ist 1-basisch, wenn sie 32 g oder 2 Atome Sauerstoff enthält.

Allgemein gesprochen ist bei allen einfachen (vgl. Anm. S. 775) Säuren die halbe Zahl der Sauerstoffatome gleich der Basizität der Säuren. Wo dies nicht der Fall ist, ist Sauerstoff in Form von Alkohol-, Keton- usw. Gruppen vorhanden. 1-basische Säuren liefern nur ein Salz (oder 1 Ester); 2-basische ein saures und 1 neutrales usw. Jedoch werden die Verhältnisse durch die Bildung von Doppelsalzen, z. B. Na-Acetat-Essigsäure, oder K-Bioxalat-Oxalsäure (sogenanntes übersaures Salz) kompliziert.

Wasserstoffe und bezeichnet z. B. eine Säure $\begin{matrix} COOH \\ \dot{C}HOH \\ \dot{C}HOH \\ \dot{C}OOH \end{matrix}$ als 4-atomige oder 4-wertige zweibasische Säure. Diese Bezeichnungsart scheint in den Fällen begründet, wo auch das Wasserstoffatom der Alkoholgruppe mehr oder weniger ionisierbar ist und in seinen Funktionen von dem der Carboxylgruppe sich nicht sehr wesentlich unterscheidet (Enolsäuren).

5. Nomenklatur. Nach den allgemeinen, für die Nomenklatur geltenden Prinzipien der Addition und der Substitution läge es nahe, entsprechend den Bezeichnungen für Monoderivate z. B. CH_3Cl als Chlormethan (Genfer Name) oder als Methylchlorid oder Chlormethyl, die Säure CH_3—COOH Carboxylmethan oder Methylcarboxyl zu benennen. Diese Bezeichnung wird indes nie angewendet, und man gebraucht bei der rationellen Namengebung statt des Suffixes -carboxyl den Ausdruck Carbonsäure oder einfach Säure.

Die Genfer Nomenklatur folgt dabei dem Prinzip der Substitution, d. h. sie benutzt zur Ableitung des Namens die Vorstellung, daß die Säure aus einem Kohlenwasserstoff durch Substitution in bestimmter Art entsteht. So erhält Essigsäure den Namen Aethansäure, Malonsäure (vgl. S. 777) den Namen Propandisäure usw. Wegen der weiteren offiziellen Bezeichnungsart in komplizierten Fällen sei auf den Artikel „Systematik und Nomenklatur" verwiesen.

Für die gewöhnlichen, häufiger vorkommenden Säuren sind auch in der Wissenschaft viel mehr als diese „rationellen" Namen gebräuchlich jene kürzeren, meist aus früherer Zeit stammenden Bezeichnungen, die unter Verzicht der Nachbildung der Konstitution durch das Wortbild sich meist ableiten von Naturprodukten, die zu den Säuren in Beziehung stehen, wie Essigsäure, Buttersäure usw. („Trivialnamen"). Als Säureradikal (acyl) bezeichnet man die mit OH verbundene, bei zahlreichen Umsetzungen als ein Ganzes reagierende Gruppe RCO. Ihr Name wird gebildet durch Anhängung der Endung yl (in einzelnen Fällen um Verwechselungen zu vermeiden -oyl) an den Stamm des lateinischen Trivialnamens:

acidum formicicum: HCO — Form-yl
acidum aceticum: CH_3CO — Acet-yl
acidum valerianicum: C_4H_9CO — Valerian-yl (Valer-yl).

Die Genfer Nomenklatur bildet natürlich ebenso wie die Namen der Säuren auch die der Radikale aus denen der Kohlenwasserstoffe gleicher C-Atomzahl und gelangt so zu Aethanoyl für CH_3—CO, Pentanoyl für C_4H_9CO usw.

Die mit dem H verbundene Gruppe RCOO, das Säureion, führt den aus den Salzen bekannten Namen z. B. CH_3COO Acetat (Essigsäure = Wasserstoffacetat). Für Reste wie $-CH_2COOH$ haben sich die Genfer Namen (Aethylsäure) sehr wenig eingebürgert.

6. Bildungsweisen. Die Bildungsweisen der Säuren lassen sich einteilen in solche

α) aus Verbindungen mit gleicher C-Atomzahl:

A. aus Säurederivaten, sowohl aus solchen mit substituiertem Stamm (Cl-, NH_2-, OH-usw. Säuren, ungesättigten Säuren), wie aus solchen mit umgebildetem Carboxyl (vgl. unten) durch entsprechende Resubstitution, Hydrolyse usw., z. B. durch Verseifung von trisubstituierten Derivaten, z. B. Nitrilen (s. o. S. 776), auch Trichloriden, z. B. $CHCl_3 \longrightarrow HCOOH$;

B. durch Oxydation (der Primäralkohole);

β) aus Verbindungen niederen C-Gehalts durch Aufbau (eigentliche Synthesen):

C. durch Addition von CO_2, CO an Metallverbindungen (s. S. 776);

D. durch Uebertragung der zum Aufbau der Kohlenwasserstoffketten verwandten Methoden auf Säuren;

γ) aus Verbindungen höheren C-Gehalts:

E. durch verseifende oder oxydierende Spaltung von tertiären Alkoholen, Ketonen, ungesättigten Verbindungen, schließlich komplizierteren Kondensationsprodukten (Acetessigester- und Malonestersynthesen);

F. durch Gärungsprozesse (fermentative Oxydationen und Spaltungen, z. B. von Kohlehydraten).

ad B: Da die oben erwähnte Oxydation der primären Alkohole über die Aldehyde als Zwischenprodukt führt, so kann natürlich auch diese Körperklasse selbst als Ausgang zur Gewinnung der Säuren dienen. — Hochmolekulare Alkohole gehen durch Erhitzen mit Natronkalk in Salze der Säuren unter Abgabe von Wasserstoff über:

$$\underset{\text{Stearylalkohol}}{C_{17}H_{35}CH_2OH} + NaOH \longrightarrow$$

$$\underset{\text{Na—stearat}}{C_{17}H_{35}COONa} + 2H_2$$

Auch die niederen Alkohole oxydieren sich allmählich in alkalischer Lösung, wobei saure Produkte entstehen. Unbeständigkeit alkoholischer Kalilauge, Braunfärbung beim Aufbewahren.

Nur in besonderen Fällen ist die CH_3-Gruppe direkt zu COOH oxydierbar ($C_6H_5CH_3$ Toluol $\longrightarrow$ C_6H_5COOH Benzoesäure; in derselben Weise entsteht Benzoe-

säure durch Aboxydierung der Seitenketten aller aromatischen Verbindungen).

ad D: Hierher gehört der Aufbau höherer Säuren aus Halogenfettsäure, Halogenalkyl und molekularem Ag (analog der Würtzschen Synthese)

$$C_2H_5J + CH_2JCOOH \xrightarrow[+2Ag]{} CH_3CH_2CH_2COOH$$

oder aus 2 Mol. Halogenfettsäureester mit Na zum Disäureester

$$2CH_2ClCOOR \longrightarrow COORCH_2{-}CH_2COOR$$

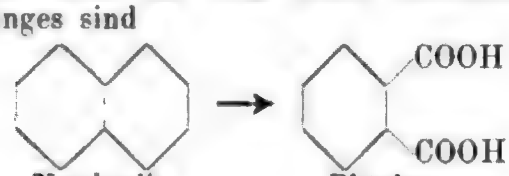
ferner nach der Friedel-Craftschen Synthese

$$C_6H_6 + COCl_2 \xrightarrow[AlCl_3]{} C_6H_5COCl + HCl.$$

ad E: Wo die Ester leicht zugänglich sind, können diese als bequemes Ausgangsmaterial zur Gewinnung der Säuren und ihrer Salze dienen. So werden praktisch in größtem Maßstabe aus den natürlichen Fetten, den Glycerinestern der Stearin-, Palmitin- und Oelsäure diese Säuren oder ihre Salze, die Seifen, durch Verseifung gewonnen (Kerzen- und Seifenfabrikation; vgl. den Artikel „Ester").

Es kann in vielen Fällen zweifelhaft sein, zu welchen Spaltstücken die betreffende Verbindung verseift oder oxydiert wird. Im allgemeinen greift die Oxydation dort an, wo sie bereits begonnen, d. h. erst bei COH, dann bei CO; ferner zuerst an CH-, dann bei CH_2-, zuletzt bei der CH_3-Gruppe (während das Bindungssystem $C{<}\begin{smallmatrix}C\\C\\C\\C\end{smallmatrix}$ den größten Widerstand leistet); an C-Atomen, die in α-Stellung zu C=O oder NO_2 u. a. stehen; besonders leicht spaltbar sind Diketone und andere Verbindungen vom Typus $RCOCH_2COR$.

In Systemen RCH_2COCH_2R pflegt CO bei der Spaltung mit dem größeren Rest zusammen zu bleiben. Ringverbindungen werden zuerst angegriffen an den den Ecken des Ringsystems benachbarten C-Atomen, auch dann, wenn diese Bestandteile eines mit dem ersten kondensierten Ringes sind



Naphtalin Phtalsäure.

Die verseifende Spaltung aromatischer Ketone beim Erhitzen mit KOH verläuft entsprechend den Formelbeispielen

$$C_6H_5{-}COC_6H_5 \xrightarrow[KOH]{} C_6H_5COOK + C_6H_6$$

$$\begin{matrix}(C_6H_5)_2\\ CH_3\end{matrix}{>}C{-}COCH_3 \xrightarrow[KOH]{}$$

$$CH_3COOK + HC{<}\begin{matrix}(C_6H_5)_2\\ CH_3\end{matrix}$$

Die oxydative Spaltung der Doppelbindung kann nur in einem Sinne erfolgen. Sie führt über intermediär entstehende Glykole zur Bildung zweier Säuren:

$$R_1HC{=}CHR_2 \longrightarrow R_1HCOH{-}HCOHR_2 \longrightarrow R_1COOH + R_2COOH.$$

Anders die Spaltung der Doppelbindung unter Addition der Bestandteile des Wassers beim Kochen mit H_2O, verdünnten Säuren und Alkalien, oder beim Schmelzen mit Alkali

z. B. $$C_6H_5CH = CHCOOH \longrightarrow \underbrace{C_6H_5CHO} + CH_3COOH$$

sekundär verwandelt in C_6H_5COOH.

Die hierhergehörigen Reaktionen sind Umkehrungen der später erwähnten Kondensationsreaktionen und verlaufen im Sinne der Rückbildung der Ausgangsmaterialien jener Kondensationen, so daß also H an das einer vorhandenen CO-Gruppe benachbarte α-C-Atom tritt, Sauerstoff dagegen an den anderen Rest.

$$\begin{matrix}CH_3\\ CH_3\end{matrix}{>}C{=}CHCOCH_3 \longrightarrow 2CH_3COCH_3.$$

Beispiele: Oxydation tertiärer Alkohole: $(CH_3)_3COH$ liefert Essigsäure und Kohlensäure (neben Aceton). Oxydation sekundärer Alkohole liefert erst Ketone, und, durch weitere Spaltung dieser, zwei Säuren bei symmetrischem Bau, bei unsymmetrischem (gemischte Ketone) dagegen vier, von denen oft zwei vorwiegen, entsprechend obigen Regeln. Aceton liefert Essigsäure und Kohlensäure. RCH_2COCH_3 liefert vorwiegend $RCOOH + CH_3COOH$ (intermediär dürfte dabei $RCHOH{:}COCH_3$ entstehen, das wie angegeben weiter gespalten wird). —

$RCOCH{<}\begin{matrix}R\\ R\end{matrix}$ liefert RCOOH und RCOR.

Die Oxydation kann verschieden geleitet werden, z. B. bei Brenztraubensäure

$$CH_3COCOOH + HNO_3 \rightarrow \text{Oxalsäure} + CO_2$$

$$CH_3COCOOH + CrO_3 \rightarrow \text{Essigsäure} + CO_2.$$

Zweibasische Säuren vom Malonsäuretyp (vgl. S. 777) $\begin{matrix}COOH\\ \dot{C}HR\\ \dot{C}OOH\end{matrix}$ spalten erhitzt CO_2 ab. Wichtige synthetische Methode für beliebige einbasische Säuren, da das Ausgangsmaterial aus Halogenalkyl und Na-Malonester leicht gewinnbar ist (vgl. l. c.). —

Ketonsäuren vom Acetessigestertyp $\begin{matrix}CH_3\\ \dot{C}O\\ \dot{C}HR\\ \dot{C}OOR\end{matrix}$

liefern mit konzentriertem alkoholischem Kali CH_3COOK und RCH_2COOK. Aehnlich wichtige synthetische Methode wie die vorige (Nebenprodukt durch Ketonspaltung; vgl. den Artikel „Ester"). —

$CH_3CH = C(CH_3)COOK + KOH$ liefert angelikasaures K

$CH_3COOK + CH_3CH_2COOK$
Acetat Propionat.

ad F. Der vom Gären und Sauerwerden zahlreicher pflanzlicher und tierischer Flüssigkeiten (Obstsäfte, Milch) her bekannte Prozeß wird technisch benutzt, um manche Säuren von großer praktischer Bedeutung zu gewinnen, wie Essigsäure und Milchsäure (vgl. den Artikel „Gärung").

7. Aufklärung der Konstitution unbekannter Säuren. Will man die Konstitution einer Säure aufklären, von der keine, Schlüsse in dieser Richtung zulassende Bildung bekannt ist, so sucht man festzustellen, welcher Kohlenwasserstoffrest oder substituierte Kohlenwasserstoffrest vorliegt, wieviel Carboxylgruppen vorhanden sind, und wo und wie sie gebunden sind. Man bestimmt zu dem Zweck nächst der Zusammensetzung und dem Molekulargewicht die Basizität (vgl. S. 777 Anm.), prüft, ob sämtlicher Sauerstoff solcher des Carboxyls ist (Abwesenheit der Reaktionen von Alkohol-, Keton-, Aethergruppen), ob eine primäre, sekundäre oder tertiäre, gesättigte, ungesättigte oder cyklische Säure vorliegt, und sucht schließlich durch planmäßige entsprechende Veränderung Spaltstücke von bekannter Konstitution zu erhalten.

8. Chemisches Verhalten. Die Reaktionen organischer Verbindungen ergeben sich zunächst additiv aus denen der sie zusammensetzenden Gruppen und zwar einmal aus der Bindungweise der Atome (Konfiguration), zweitens aus der Qualität dieser Atome selbst; schließlich aus der Abänderung der Eigenschaften einzelner Gruppen unter dem Einfluß anderer. Man wird danach imstande sein auch die Eigenschaften der Säuren als solche ihrer Formelbestandteile, nämlich 1. als solche des Kohlenwasserstoffradikals, 2. als solche der Carboxylgruppe, 3. als durch gegenseitige Beeinflussung dieser zustandekommende zu definieren und bis zu gewissem Grade bei unbekannten vorauszusagen, besonders auch die Zahl möglicher Isomerer. In der Leistungsfähigkeit der Formel bei derartiger Anwendung als heuristisches Prinzip liegt der beste Beweis ihrer Zweckmäßigkeit. An Reaktionen des Carboxyls, als einer komplexen Gruppe, werden z. B. zu erwarten sein solche der OH-Gruppe resp. des in ihr enthaltenen Wasserstoffs, solche der CO-Gruppe, und Reaktionen, die sich durch gegenseitige Beeinflussung beider ergeben. Es sei gleich im voraus bemerkt, daß von den zu erwartenden Eigenschaften, die der CO-Gruppe am meisten verändert sind, so daß die Zahl der Analogien mit anderen CO-haltigen Verbindungen (Ketone, Aldehyde) gering ist.

8a) Reaktionen des Kohlenwasserstoffrestes. Es genügt hier auf die die Kohlenwasserstoffe behandelnden Artikel zu verweisen (vgl. den Artikel „Kohlenwasserstoffe" u. a.). Die Säuren lassen sich unschwer, nämlich durch Erhitzen ihrer Ca-Salze mit Natronkalk

$$(CH_3COO)_2Ca + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CH_4 + 2CaCO_3$$

in die Kohlenwasserstoffe überführen, als deren Carboxylderivate sie nach unseren Formeln erscheinen. Unabhängig vom Carboxyl lassen sich alle jene Veränderungen am Stamm der Säure ausführen, die an jenen Kohlenwasserstoffen möglich sind (Einführung von Halogen, NH_2, OH usw.). Die Chlorierung ist genau wie bei den Kohlenwasserstoffen durchführbar: entweder direkt durch das freie Halogen, oder mit PCl_5 bei den Oxy-Verbindungen, oder schließlich durch Cl_2 und HCl-Addition an ungesättigte Verbindungen (oder an Laktone; vgl. S. 787). Von den Halogenderivaten aus gelangt man in bekannter Weise zu Amido- und Oxy-Verbindungen. Die Art der Umbildung des Kohlenwasserstoffkernes und die Eigenschaften der dabei entstehenden Säuren werden in dem Abschnitt „stammsubstituierte Säuren" später des näheren besprochen, ebenso der gegenseitige Einfluß von Kohlenwasserstoffkern und COOH-Gruppe.

8b) Reaktionen der C=O-Gruppe. Man faßt in der organischen Chemie (vgl. Bd. I. S. 185) als ungesättigt im weiteren Sinne alle Stoffe auf, bei denen zur Bindung irgend zweier Elemente mehr als eine ihrer Valenzen als beansprucht anzunehmen ist. Jedoch nur insoweit, als sie zu gewissen Reaktionen (Addition,[1]) Polymerisation, Spaltbarkeit, Oxydation, Reduktion u. a.) besonders befähigt sind. Wie nun unter den Verbindungen, deren analytisch ermittelte Zusammensetzung wir durch ein die Gruppe C = C enthaltendes Formelbild zum Ausdruck zu bringen pflegen, neben typisch ungesättigten (mit „Aethylendoppelbindung") auch zahlreiche Verbindungen mit mehr oder weniger gesättigtem Charakter sind, vor allem das Benzol und seine unzähligen Derivate, so finden wir in

[1]) Dabei ist nur die Art der addierbaren Atome oder Gruppen abhängig von der Qualität der addierenden Atome. C = C addiert z. B. Halogen, Halogenwasserstoff u. a., C = O dagegen NH_3, HCN, Malonester u. a.

der Sauerstoffreihe bei Verbindungen, denen die Gruppe C = O zugeschrieben wird, solche typisch ungesättigten Charakters, wie die Aldehyde, weniger ungesättigte, wie die Ketone, während in den Säuren jene Eigenschaft am schwersten wiedererkennbar und der Charakter der CO-Gruppe am meisten verändert ist. Die Erklärung dafür liegt ohne Zweifel in der Beeinflussung sowohl durch die benachbarte OH-Gruppe, wie durch den Kohlenwasserstoffrest.

Die wesentlichen allgemeinen Eigenschaften der Doppelbindung (vgl. oben) sind völlig oder doch fast ganz geschwunden; die Doppelbindung ist ähnlich inaktiv geworden wie die C = C-Doppelbindung in den aromatischen Verbindungen. Aehnlich wie dort aber lassen eine Anzahl Reaktionen die Deutung zu, daß die Inaktivität der Doppelbindung nur scheinbar ist, während sie möglicherweise an vielen Vorgängen unter Additionen teilnimmt, während in der zweiten Phase der Reaktion wieder Abspaltungen eintreten, die die ursprüngliche Doppelbindung (aber eventuell am anderen Sauerstoffatom) regenerieren. Derartige Additionen mit nachfolgender Abspaltung sind ja durchaus häufig (vgl. den Artikel „Aliphatische Kohlenwasserstoffe", S. 188). Es sei hier erinnert an den leichten Uebergang tertiärer Halogenderivate in ungesättigte Kohlenwasserstoffe unter Abspaltung von Halogenwasserstoff, vor allem aber an die Bildung kernsubstituierter aromatischer Halogenverbindungen, während intermediär anzunehmen sind (und unter geeigneten Verhältnissen auch erhalten werden können) Halogenadditionsprodukte an den Benzolring, also Derivate der Hexamethylenreihe, die durch Abspaltung von Halogenwasserstoff wieder in solche des Benzols übergehen. Aehnlich liegen die Verhältnisse bei den O-Derivaten, z. B. bei der katalytisch erzielbaren Ueberführung der gesättigten primären Alkohole in die Aldehyde mit ungesättigtem Charakter (Bd. I, S. 189) und Wasserstoff

$$CH_2{-}OH \rightleftarrows CH{=}O + H_2$$

Weiter gehören dahin die bei den Aldehyden den zuerst anzunehmenden Additionen oft folgenden Abspaltungen (Uebergang von Aldol in Crotonaldehyd; Bildung der Oxime und Hydrazone). So ist es denkbar, daß selbst so einfache Reaktionen, wie die Salzbildung der Säuren primär Additionsvorgänge darstellen nach dem Schema

$$RC\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{OH} + NaOH \longrightarrow RC\begin{matrix}ONa\\OH\\OH\end{matrix},$$ und daß

erst diese gebildeten ortho-Verbindungen durch Abspaltung das isolierbare Reaktionsprodukt liefern.

$$RC\begin{matrix}ONa\\OH\\OH\end{matrix} \longrightarrow RC\genfrac{}{}{0pt}{}{ONa}{O} + HOH.$$

Es steht dahin, ob in den bei einzelnen Säuren, z. B. Ameisensäure, Oxalsäure, Essigsäure, bekannten Hydraten derartige Additionsprodukte in Gestalt von ortho-Derivaten vorliegen.

Im allgemeinen zeigt das Carboxyl der Säuren keine für Doppelbindungen typische Reaktionen. Die Säuren sind z. B. weder leicht oxydierbar noch reduzierbar, im Gegensatz zu anderen CO-haltigen Verbindungen, wie den Aldehyden, Chinonen (und auch noch Ketonen). Ausnahmsweise leicht oxydierbar sind Ameisen- und Oxalsäure, die stark reduzierend wirken und z. B. Permanganat schnell entfärben. Beide enthalten kein Alkyl an CO gebunden. Man vergleiche den stufenweis abnehmenden ungesättigten Charakter von:

$HC\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{O}$;	$RC\genfrac{}{}{0pt}{}{H}{O}$;	$HC\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{OH}$;	HOOC—COOH;
Form-aldehyd	andere Aldehyde	Ameisen-säure	Oxalsäure

RCOR;	RCOOH;	$OC\genfrac{}{}{0pt}{}{OH}{OH}$
Ketone	Säuren	Kohlensäure.

Mit stark wirkenden Reagentien verläuft die Oxydation der Säuren destruktiv, und führt bei höheren aliphatischen Verbindungen häufig zur Bildung von Bernsteinsäure (vgl. S. 786), Essigsäure, Oxalsäure und schließlich Kohlensäure. Beträchtlichen Widerstand setzt die COOH-Gruppe auch der Reduktion entgegen. Wo eine solche eintritt, wie mit HJ, führt sie zu Alkohol oder gleich zum Kohlenwasserstoff, nicht aber zu den Aldehyden. Es ist bemerkenswert, daß bei Säuren, die gleichzeitig alkoholisches OH enthalten, eher diese — sonst ebenfalls schwer reduzierbare — Gruppe angegriffen wird, als das Carboxyl (Reduktion der Glykolsäure zu Essigsäure[1]). Neuere Forschungen haben gezeigt, daß auch hier bei Anwendung geeigneter Katalysatoren (Metalle in „aktiver Form") derartige Reduktionen mit Hilfe von Wasserstoff bei geeigneten physikalischen Bedingungen durchführbar sind. So sind gewisse einbasische Säuren katalytisch

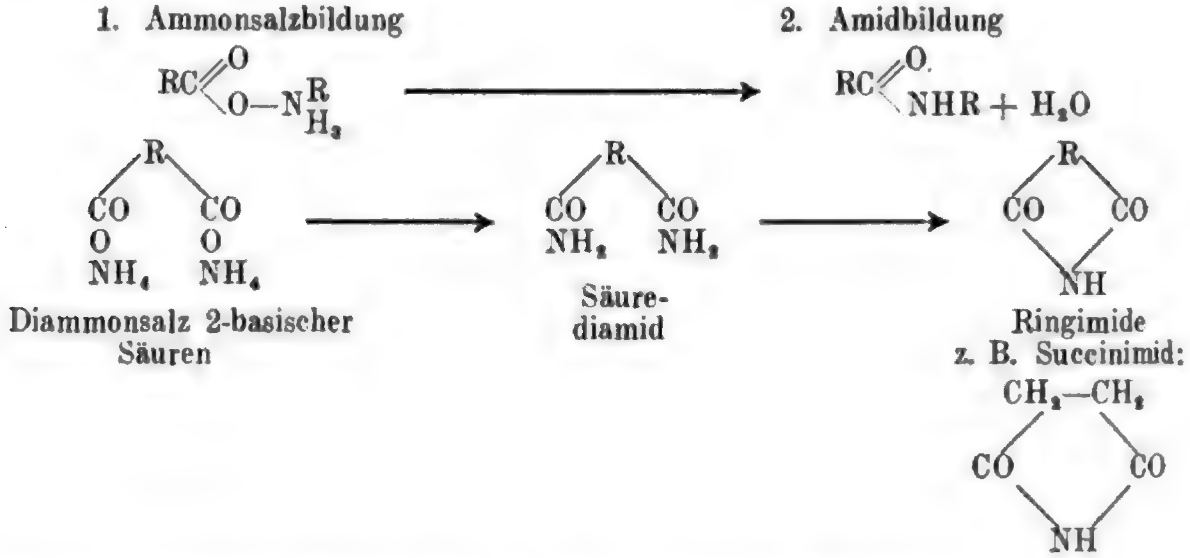
[1]) Thermochemische Begründung des Widerstandes solcher Verbindungen bei der Reduktion vgl. van 't Hoff: „Ansichten über die organische Chemie", 3, 72.

direkt zum Aldehyd reduziert worden. — Die Säuren addieren weder HCN[1]) noch NH_3. Letzteres wenigstens nicht direkt, weil bei der Neigung des Ammoniakstickstoffs, 5-wertig zu werden, die Reaktion unter Bildung des Ammonsalzes verläuft. Bei höheren Temperaturen jedoch, wo die Neigung zur 5-Wertigkeit zurücktritt und bei schwächer basischen substituierten Ammoniaken (Anilin) entsteht ein Amid von der typishen Formel $RC{}^{O}_{NH_2}$; entweder durch H_2O-Abspaltung direkt aus dem NH_4-Salz oder nach vorhergehender Anlagerung in anderem Sinne und Abspaltung

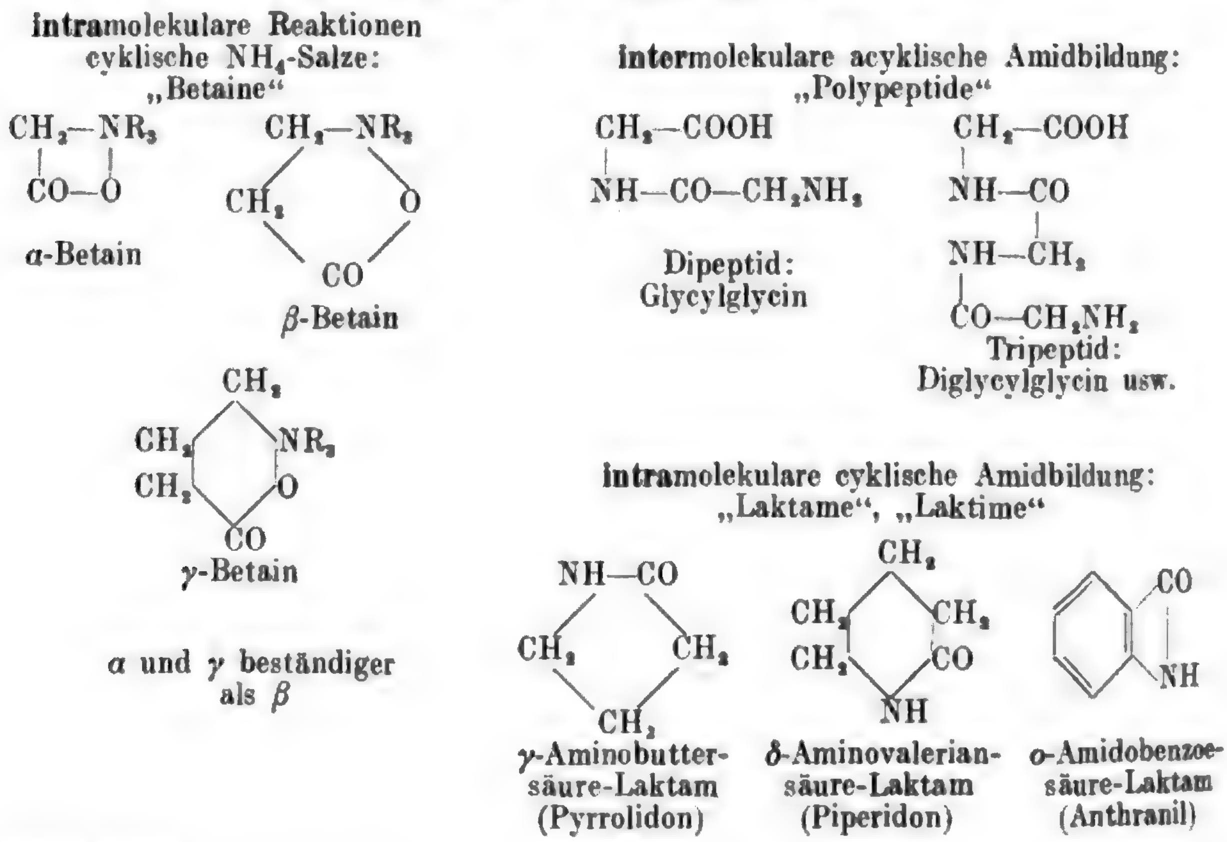
$$NH_3 + RC{\overset{O}{\underset{OH}{\lessgtr}}} \longrightarrow RC\overset{OH}{\underset{NH_2}{OH}} \longrightarrow RC{}^{O}_{NH_2}$$

Die Reaktion soll besonders bei tertiären Säuren wenig glatt verlaufen (Grund?).

Die zu sehr mannigfachen Produkten führenden Reaktionsmöglichkeiten zwischen COOH- und NH_2-Gruppe gibt folgendes Schema wieder:



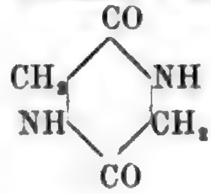
Wenn in demselben Molekül COOH- und NH_2-Gruppe vereint sind:



---

[1]) Essigsäureanhydrid addiert KCN unter Bildung von Diacetyldicyanid.

intermolekulare cyklische Amidbildung (analog den Laktiden, vgl. S. 787) zwischen 2 Mol. α-Amidosäure:

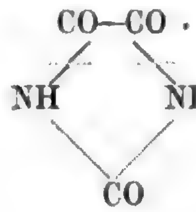


„Diketopiperazim" aus 2 Glykokoll.

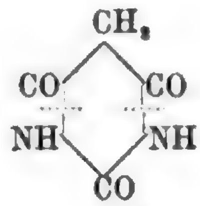
Reaktionen zwischen COOH und NH_2 des Harnstoffs (Ursäuren und Ureide, entsprechend den Aminosäuren und Säureamiden):

Cyklische Ureide zweibasischer Säuren:

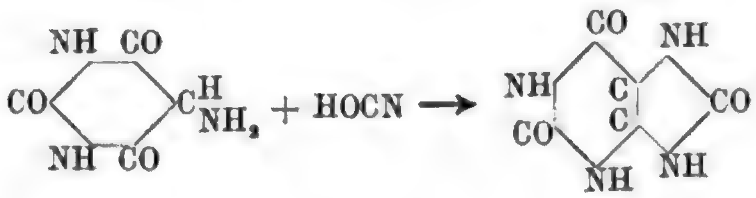
Oxalsäure + Harnstoff: Parabansäure



Malonsäure + Harnstoff: Barbitursäure



Aminobarbitursäure + HOCN — H_2O: Harnsäure



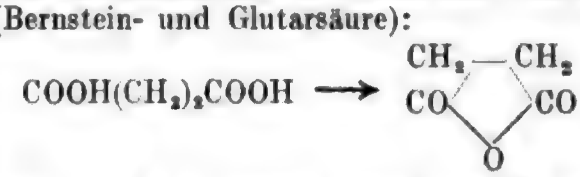
R e a k t i o n e n d e r O H - G r u p p e u n d d e s W a s s e r s t o f f s i n i h r. In den Carbonsäuren kann wie bei allen Sauerstoffsäuren sowohl das OH als Komplex, wie — häufiger — der Wasserstoff allein in Reaktion treten (der zweite Bestandteil des OH-Komplexes dagegen, der Sauerstoff, tritt allein wohl niemals selbständig in Reaktion). Von Reaktionen der ersten Art ist besonders der Ersatz des Hydroxyls durch Halogen zu erwähnen, welcher mit Hilfe der Phosphorhalogenide — oder durch freies Halogen bei Gegenwart von elementarem Phosphor — bewirkt wird:

$$RCOOH + PCl_5 \longrightarrow RCOCl + POCl_3 + HCl$$

Indirekt läßt sich durch Umbildung der entstandenen Säurehaloide OH ersetzen durch CN, NH_2, N_2H_3 usw. (nicht aber durch andere Gruppen wie SO_3H und NO_2 usw.). Alle diese Verbindungen werden zum Teil im Abschnitt II (Verbindungen mit umgewandelter Carboxylgruppe) zum Teil an anderer Stelle besprochen. Ein Austritt von Säurehydroxyl mit reaktivem Wasserstoff anderer Verbindungen als Wasser findet statt bei der unter der Einwirkung von P_2O_5 erfolgenden Anhydrisierung zweier COOH-Gruppen:

$$2CH_3COOH \longrightarrow \begin{matrix} CH_3CO \\ CH_3CO \end{matrix}\!>\!O$$

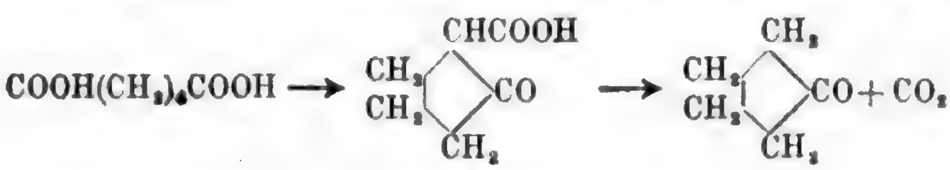
oder intramolekular bei 2-basischen Säuren (Bernstein- und Glutarsäure):



auch bei der — schwer, unter dem Einfluß von P_2O_5, erfolgenden — Bildung von Säurechloriden gemäß der Gleichung:

$$RCOOH + HCl \longrightarrow RCOCl + H_2O$$

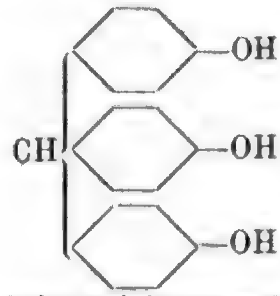
Beim Erhitzen mancher höherer 2-basischer Säuren (B. 45. 1604) kann OH mit an C gebundenem H als Wasser austreten:



H_2O-Abspaltungen zwischen CH und COOH, z. B. zwischen Säure und Kohlenwasserstoff mit P_2O_5, verlaufen sonst sehr träge und unvollständig (B. 5, 497; B. 6, 536), leicht dagegen zwischen Säure und Phenolen:

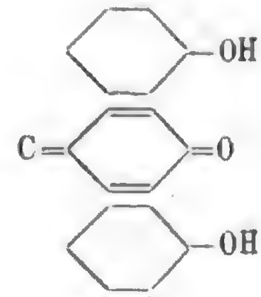


Dioxyacetophenon

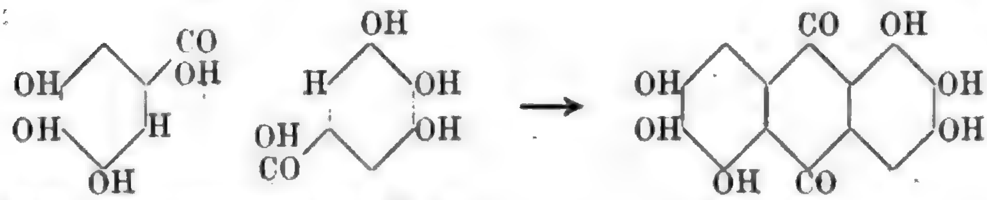


Trioxytriphenylmethan

aus Ameisensäure + Phenol + $ZnCl_2$; autoxydabel zu



Aurin



2 Mol. Gallussäure + konz. H_2SO_4 → Rufigallol

Die Reaktionen des Wasserstoffs in den Carbonsäuren unterscheiden sich nur quantitativ, ihrem Wesen nach aber in nichts von denen der anorganischen Säuren. Hier wie dort finden wir die Abdissoziierbarkeit als Ion durch Lösungsmittel, vor allem durch Wasser, die „saure" Reaktion auf Indikatoren bei den löslichen (z. B. Rötung von blauem Lakmuspapier), die H-Entwickelung mit Metallen, besonders den stark basischen, schließlich als wichtigste Reaktion, die Fähigkeit des Wasserstoffs zusammen mit Sauerstoff oder OH von Basen und Alkoholen als Wasser auszutreten unter Entstehung von Salzen und Estern, mit dem Hydroxyl anderer Säuren unter Bildung von Säureanhydriden.

Der Säurewasserstoff kann auf diese Weise ersetzt werden durch Metalle, Alkyle und Acyle, er ist dagegen nicht ersetzbar durch Halogen, die Amido-, Cyangruppe u. a. (über die Ersetzbarkeit durch OH unter Entstehung von Persäuren vgl. S. 774 und 812). Mit reaktivem doppelt gebundenem Sauerstoff organischer Verbindungen, z. B. der Aldehyde und Ketone, vermag der Säurewasserstoff in der Regel nicht direkt auszutreten. Verbindungen wie

$$CH_3CH\left\langle\begin{array}{l}OCOCH_3\\OCOCH_3\end{array}\right.$$

Aethylidendiacetat

entstehen aber leicht aus den Anhydriden der Säuren mit Aldehyden.

In die Art und Weise, wodurch der Wasserstoff des Hydroxyls derart reaktiven Charakter erhält, gewinnt man Einblick durch Vergleich mit Verbindungen, die die Konfiguration der Carbonsäuren ganz oder zum Teil besitzen. Das Verhalten gebundenen Wasserstoffs ist einmal bedingt durch die Art des Elements, an das er direkt gebunden ist (vgl. CH, NH, OH, ClH), es wird aber ebenso beeinflußt durch die Bindungsweise jenes Elements an benachbarte andere und durch deren Natur (vgl. —CH; =CH; ≡CH; C—OH; C=C—OH; O=C—OH). In Alkoholen und in Säuren ist der Wasserstoff beweglich und durch Metallatome ersetzbar, aber mit sehr verschiedener Leichtigkeit. Die entstehenden „Salze" sind bei den Alkoholen (Alkoholate) sehr leicht hydrolysierbar, bei den Säuren dagegen beständig, und schwer und unvollständig hydrolysierbar. Die Beweglichkeit des Wasserstoffs in den Carbonsäuren entspricht somit völlig der der nach demselben Schema E=E—EH konstituierten Sauerstoffsäuren der anorganischen, und der Phenole oder der, entgegen der sogenannten Erlenmeyerschen Regel beständigen, ausgeprägten Säurecharakter besitzenden Enole C=COH der organischen Chemie. Diese letzteren zeigen bekanntlich Neigung zum Auftreten in 2 tautomeren Formen HO.C=C ⟷ O=C—CH. Bei den Carbonsäuren dürfte ein derartiges Verhalten auch anzunehmen sein und viel zur Reaktivität der Säuren beitragen, nur ist hier das Formelbild trotz Platzwanderung des Wasserstoffs gleich oder symmetrisch, so daß äußerlich voneinander unterscheidbare Isomere nicht entstehen können:

$$\underset{1}{O}=C-\underset{2}{O}.H \rightleftarrows H\underset{1}{O}-C=\underset{2}{O}.$$ [1]

[1] Der „negativierende" Einfluß des Nachbarsauerstoffatoms auf die OH-Gruppe zeigt sich übrigens auch, abgeschwächt, wenn beide nicht am selben C-Atom haften (stärker saurer Charakter von Oxy-, Keton- oder Polysäuren gegenüber den einfachen). Aehnlich nimmt den einfachen Alkoholen gegenüber der saure Charakter bei Polyalkoholen oder beim Hydroxyl der Oxysäuren zu (van 't Hoff, „Ansichten über die organische Chemie", 3, 134).

Beeinflussung von COOH, d. h. des Säurecharakters durch den Kohlenwasserstoffrest. Da die Carboxylgruppe allen Carbonsäuren gemeinsam ist, so müssen alle qualitativen und quantitativen Verschiedenheiten im Verhalten dieser Gruppe bei den verschiedenen Säuren bewirkt sein durch den Einfluß des — einfachen oder substituierten — Kohlenwasserstoffrestes. So z. B. die in der Verschiedenheit der Dissoziationskonstante zutage tretende und meßbare Säurestärke, d. h. die relative Zersetzbarkeit der Säure durch Wasser unter Bildung von freiem Wasserstoffion nach der jetzt geltenden Auffassung.[1]) Unter den einbasischen gesättigten Fettsäuren nimmt die Ameisensäure an Stärke eine Sonderstellung ein. Ungefähr $^1/_{10}$ davon beträgt die der Essigsäure, in sehr allmählichen Stufen nimmt die Stärke dann weiter ab mit steigender Länge der C-Kette. Sekundäre Säuren sind etwas stärker, tertiäre merklich schwächer als die primären Isomeren. Die Stärke von Essigsäure beträgt roh angenähert $^1/_{5000}$ der der Salzsäure (es ist zu betonen, daß solche Vergleiche nur für bestimmt definierte Konzentrationen und Temperaturen ausführbar sind und Geltung haben). Merkliche Zunahme erfährt die Acidität durch Einführung von Halogen, Hydroxyl, Carbonyl, C_6H_5, Doppelbindung, und zwar wachsend mit der Zahl der Gruppen und mit der Nähe zur Carboxylgruppe. Im Vergleich mit der Stärke der unsubstituierten Essigsäure ist die der Cl-Essigsäure 100-mal, die der Cl_2-Säure 3000-mal, die der Cl_3-Säure 20000-mal, die der Ameisensäure 10-mal, die der Oxalsäure 2000-mal größer (alles in angenäherten Zahlen). Gegenüber der Propionsäure ist α-Milchsäure 30-mal, β-Säure 10-mal, Brenztraubensäure 450-mal, Malonsäure 120-mal stärker. Gegenüber der Buttersäure ist die Crotonsäure 1,3-mal, die Bernsteinsäure 4-mal, Fumarsäure 60-mal, Maleinsäure 1000-mal stärker[2]), während Acetylendicarbonsäure die Stärke der Schwefelsäure erreicht (die Formeln der Säuren findet man im Abschnitt 12). Die aromatischen Säuren sind stärker als die aliphatischen. Die Cl- oder NO_2-substituierten Benzoesäuren verhalten sich entsprechend der Entfernung jener Substituenten vom Carboxyl.

Von den ungesättigten Säuren sind die $\Delta\alpha\beta$ ziemlich gleich stark wie die gesättigten, erheblich stärker dagegen sind diejenigen, welche Doppelbindung in $\beta\gamma$-Stellung, also weiter vom Carboxyl weg, enthalten.

Die Di-Säuren sind wie alle 2-basischen Säuren einer stufenweisen Dissoziation fähig. Die Abdissoziation des zweiten H-Atoms beginnt erst bei großer Verdünnung, wenn die Dissoziation der ersten Stufe schon zur Hälfte vollständig ist. Saure Salze dissoziieren Wasserstoff erst ab, wenn alles Metall ionisiert ist.

Der abnehmenden Stärke entsprechend zeigen die Salze der Säuren höheren Molekulargewichts merkliche Neigung zur Hydrolyse in wässeriger Lösung (z. B. die Seifen; Trübung ihrer stark verdünnten Lösung durch ausgeschiedene Fettsäure oder saure Salze), während an frisch bereiteten kalten Lösungen, von Natriumacetat z. B., alkalische Reaktion kaum zu bemerken ist.

Als ein weiteres Beispiel der Beeinflussung der Reaktivität der COOH-Gruppe sei erwähnt die mit der Länge der Kette wachsende Tendenz der Säure zur CO_2-Abspaltung. Hochmolekulare Säuren können nur im Vakuum unzersetzt destilliert werden. Die CO_2-Abspaltung wird in hohem Maße beeinflußt durch weitere im Stamm der Säure und in der Nähe des Carboxyls befindliche Substituenten, so z. B. durch weitere Carboxyle: Malonsäure und Homologe

$$CHR\begin{matrix}COOH\\COOH\end{matrix}$$

liefern beim Erhitzen $CO_2 + CH_2RCOOH$, ähnlich die β-Ketonsäuren; Mellithsäure $C_6(COOH)_6$ geht über in $2CO_2 + C_6H_2(COOH)_4$;

$$\underset{\text{Amidobenzoesäure}}{C_6H_4NH_2COOH} \longrightarrow \underset{\text{Anilin.}}{C_6H_5NH_2} + CO_2$$

Auch die Phenolsäuren, nicht aber die fetten Oxysäuren verlieren in der Hitze leicht CO_2. Die Alkalisalze der Trichloressigsäure und Acetylendicarbonsäure werden schon beim Erwärmen der H_2O-Lösung zersetzt.

Alle Reaktionen der Säuren, bei denen das Carboxyl auch nicht direkt beteiligt ist, stehen doch mehr oder minder unter seinem Einfluß. Der Unterschied im Verhalten des Kohlenwasserstoffkerns in den Säuren von dem in den Kohlenwasserstoffen selber ist bedingt durch den Einfluß des Carboxyls auf jene nach Annahme unserer Formeln unverändert bleibenden Gruppen. Der Einfluß erstreckt sich auf das Ganze des Moleküls sowohl, wie auf einzelne Teile. Das ganze Molekül wird, wie verständlich, um so weniger beeinflußt, je länger die C-Kette ist. Das zeigt sich schon im äußeren Habitus aufs deutlichste. Die Anfangsglieder der Säuren sind stechend riechende Flüssig-

[1]) Die Säurewirkung, z. B. die Rötung von Lakmus, kommt erst bei Zutritt von Wasser zustande. Die wasserfreien Säuren zeigen diese Wirkung nicht.

[2]) Dies stimmt überein mit der Annahme daß in der Maleinsäure die Carboxyle einander naheliegen, auf derselben Seite des C-Atompaares.

keiten und in Wasser löslich, die der Kohlenwasserstoffe dagegen wasserunlösliche Gase; die höheren Glieder der Säuren dagegen werden den Paraffinen in allen physikalischen Eigenschaften immer ähnlicher.—Der Einfluß in chemischer Beziehung kommt zum Ausdruck in einer Auflockerung oder erhöhten Beweglichkeit der H-Atome (bei Substitutionen, Kondensationen, Oxydationen) wie der eingeführten Substituenten beim Austausch gegen andere, bei Abspaltungen (auch innerhalb des Moleküls) usw.

Beispiele: Die reduzierende Wirkung der Methingruppe gegen $KMnO_4$, die schon bei Kohlenwasserstoffen (vgl. den Artikel „Aliphatische Kohlenwasserstoffe") auftritt, zeigen die tertiären Säuren in erhöhtem Maße. Gleiches gilt für die Nitrierbarkeit. — Säuren (wenigstens in Form ihrer Anhydride oder Halogenide) sind in der α-Stelle gegenüber den Kohlenwasserstoffen leichter chlorierbar; ebenso zeigen sie leichtere Resubstitution des Halogens durch Wasserstoff. Gebromte Säuren werden mit Jodiden (von K, Ca, Mg) leichter jodiert als die Kohlenwasserstoffe. — Ungesättigte Säuren addieren leichter H_2 als ungesättigte Kohlenwasserstoffe, vornehmlich solche des $\alpha\beta$-Typs.

Der Einfluß des Carboxyls erstreckt sich insonderheit auf die näherstehenden Teile des Moleküls, steht indessen nicht ganz im Verhältnis zur Nähe der Stellung, und äußert sich auf das α-, β-, γ- und δ- C-Atom in verschiedener charakteristischer Weise (vgl. unten und im Artikel „Aliphatische Kohlenwasserstoffe" die Vorstellungen über Spiralform der C-Kette).

Die meisten Carbonsäuren enthalten zwei Atomsysteme der Form HE — E = E, nämlich HO — C = O und HC — C = O. Es kann daher nach dem auf S. 784 Bemerkten nicht verwundern, daß auch die Wasserstoffe des α-ständigen Methanrestes besonders beweglich sind, d. h. den Veränderungen, die an C gebundener Wasserstoff überhaupt erleiden kann, besonders leicht zugänglich sind. In dem besonderen Fall, wenn eine solche CH_2-Gruppe noch Glied eines weiteren Doppelbindungssystems obiger Form ist, kann sich die Reaktivität so steigern, daß der Methylenwasserstoff direkt methylierbar wird, wie im Glutaconsäureester $COORCH{=}CH{-}CH_2COOR$, oder selbst, ähnlich wie in OH, durch Metall ersetzbar wird, wie bei den Verbindungen vom Typus $RCOCH_2COR$ (Acetessigester u. ä.; vgl. S. 808) oder in der Nitroessigsäure. Diese spielt die Rolle einer 2-basischen Säure, ihr Ester $CH_2NO_2.COOR$ zersetzt Carbonate. — In den freien Säuren konkurrieren die beiden Systeme OH—C=O und CH—C=O, wobei „die auflockernde Wirkung ganz vorwiegend auf das seiner Natur nach an sich beweglichere" H-Atom (d. h. das in OH) wirkt; „die Doppelbindung verausgabt gewissermaßen ihre Außenwirkung an dieses H-Atom, so daß für das zweite nur noch wenig übrig bleibt" (Thiele, Ann. **306**, 116). α-Wasserstoffe (nur diese) besitzen indessen z. B. die Fähigkeit, sich an der Addition fähige reaktive Gruppen anderer Verbindungen (z. B. an das CO der Aldehyde) zu addieren und eventuell darauf folgend Kondensationsprodukte unter Abspaltung von H_2O zu geben, z. B.

$$RC^{H}_{O} + CH_2R{-}COONa \longrightarrow RC^{H}_{OH}{-}CHR{-}COONa \longrightarrow RCH = CR{-}COONa$$

(Perkinsche Synthese)

$$2RCH_2COOR \xrightarrow[+\ NaOC_2H_5]{} RCH_2{-}CO{-}\underset{R}{CH}{-}COOR$$

(Claisensche Synthese)

In diesen Fällen verwendet man nicht die freien Säuren zur Kondensation, sondern Derivate, in denen der Carboxylwasserstoff ersetzt ist.

Zimtsäure addiert 1 Mol. NH_2OH, Zimtsäureester dagegen 3 (vgl. Ann. **389**, 1). — Die Halogenide oder Anhydride der Säuren sind im Vergleich mit den freien Säuren viel leichter der Substitution durch Halogen am α-C-Atom zugänglich. Auch in diesen Fällen ist der Hydroxylwasserstoff substituiert, und der Einfluß des Carbonyls also dadurch mehr in anderer Richtung konzentriert.

Eine direkte Oxydierbarkeit am α-H zeigt Essigsäure, die bei hoher Temperatur durch CuO oder HgO in alkalischer Lösung in Glykolsäure übergeht. Häufiger greift die Oxydation am γ-C-Atom an, so daß Bernsteinsäure als Spaltungsprodukt gesättigter Säuren auftritt. So liefert Capronsäure (C_6) und Oenanthsäure (C_7) Essigsäure bezw. Propionsäure neben Bernsteinsäure; Buttersäure ist direkt mit HNO_3 zu Bernsteinsäure oxydabel.

Der Verlauf der Oxydation ist aber auch abhängig von der Art der Gruppen im Kohlenwasserstoffrest; tertiäre werden zuerst angegriffen; z. B. verläuft die Oxydation der i-Heptylsäure entsprechend dem Schema

$$CH_3\,CH_2\,CH_2\,CH_2\,\underset{\displaystyle CH_3}{\dot{C}H}.COOH \longrightarrow \ldots.CH_2\,\underset{\displaystyle CH_3}{\dot{C}}OH\,COOH \longrightarrow$$

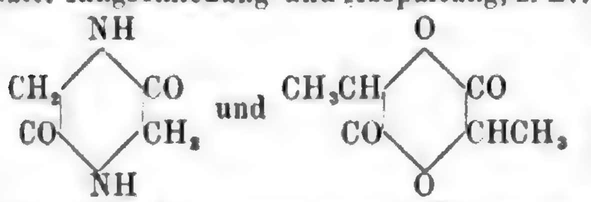
$$\ldots.\,CH_2\,CO\,CH_3 + CO_2 \longrightarrow \ldots.COOH + CH_3\,COOH$$

Allgemein zeigen die 4 Typen:

α) $RCH_2\ \ CH_2\ \ CH_2\ \ CHX\ COOH$
β) $RCH_2\ \ CH_2\ \ CHX\ \ CH_2\ \ COOH$
γ) $RCH_2\ \ CHX\ \ CH_2\ \ CH_2\ \ COOH$
δ) $RCHX\ \ CH_2\ \ CH_2\ \ CH_2\ \ COOH$

Neigung zu den folgenden Reaktionen:

Der α-Typ bildet häufig ein Reaktionsprodukt zweier Moleküle (intermolekular) unter Ringschließung und Abspaltung, z. B.:



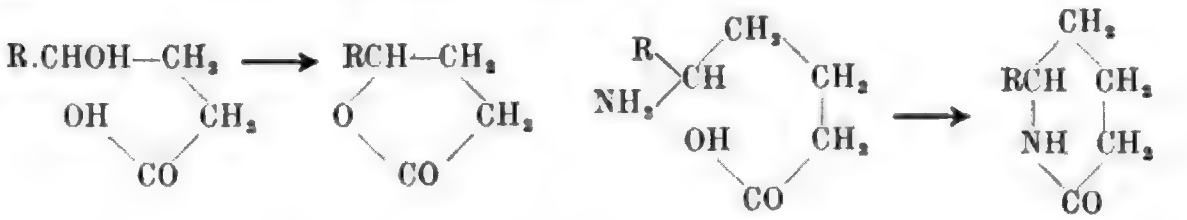
Glykokollanhydrid[1] und Lactid (Anhydrid von 2 Mol. α-Milchsäure)

Der β-Typ liefert intramolekulare Abspaltungsprodukte unter Entstehen einer Doppelbindung:

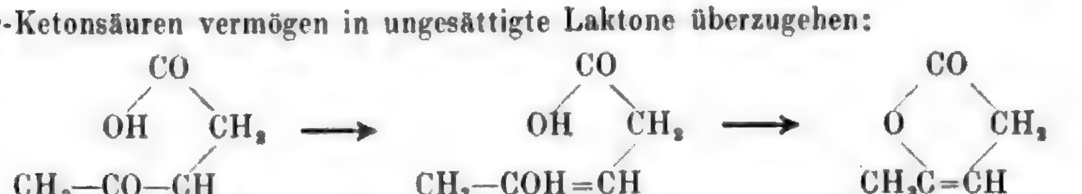
$$RCHX{-}CH_2{-}COOH \longrightarrow RCH{=}CH{-}COOH + HX$$

Die Reaktion kann eventuell dabei weitergehen und ungesättigten Kohlenwasserstoff unter CO_2-Abspaltung erzeugen[1]).

Der γ- und der δ-Typ geben ebenfalls ein intramolekulares, aber ringförmiges Abspaltungsprodukt. Ist X gleich OH oder Halogen, so entstehen Laktone, ist $X = NH_2$, so entstehen Laktame, Verbindungen, die der Furan-, Pyrrol-, Pyron- und Pyridinreihe angehören, z. B.

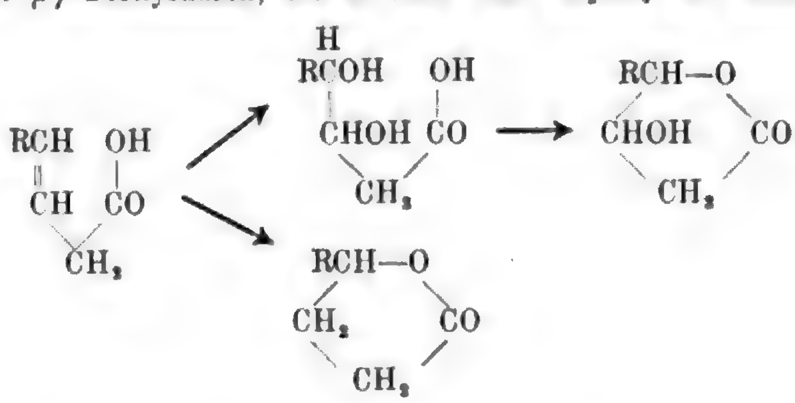


γ-Ketonsäuren vermögen in ungesättigte Laktone überzugehen:



Lävulinsäure → Angelikalakton

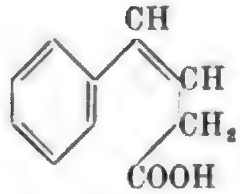
Aus Δβγ-Säuren erhält man bei der Oxydation statt βγ-Dioxysäuren, die zugehörigen Oxy-Laktone und beim Kochen mit verd. H_2SO_4 die einfachen Laktone

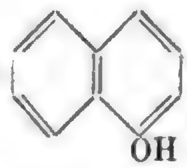


Häufig werden γ- oder δ-substituierte Säuren synthetisch verwandt zur Gewinnung heterozyklischer Ringsysteme aller Art, z. B. aromatische Säuren, die im Kern o-substituiert, in bezug auf das Carboxyl aber γ- oder δ-substituiert sind, zur Synthese von Derivaten des Chinolins, Indols, Cumarons, Furans, Indens, Naphtalins. Ungesättigte Säuren können auch ohne weitere Substitution reagieren, z. B. gibt:

[1]) Ueber andere Kondensationen zwischen COOH- und NH_2-Gruppe vgl. S. 783.

[1]) Ueber ausnahmsweise Abspaltungen aus substituierten Säuren in 1,4 Stellung vgl. Ann. **306**, 108.



Phenyl-i-crotonsäure destilliert


α-Naphtol.

Anhangsweise sei erinnert, daß bei der sogenannten Hofmannschen Reaktion (Säureamide + Br + Alkali) verschiedene Produkte, je nach der Länge der C-Kette entstehen, also auch darin ein Einfluß des Kohlenwasserstoffrests auf die Reaktionen des Carboxyls sichtbar ist.

9. Physikalische Eigenschaften. Die Schmelzpunkte der normalen Fettsäuren ebenso wie die der Disäuren geben, in ein Koordinatensystem eingetragen, keine stetige, sondern eine Zickzackkurve. Die Säuren mit gerader C-Zahl schmelzen höher, die mit ungerader tiefer. Bei den Monosäuren findet in jeder Reihe für sich anfangs ein Sinken bis C_4 resp. C_5, dann aber ein stetiges Steigen der Schmelzpunkte statt. Bei Disäuren wird in der ungeraden Reihe auch wieder ein Minimum erreicht bei C_5, dem stetiges Steigen der Kurve folgt, während die Schmelzpunkte der geraden Reihe von Anfang an fallen. Beide Kurven müssen sich dabei der Geraden nähern, d. h. einem konstanten, bei ca. 125° liegenden Schmelzpunkt. Je höher man in der Reihe hinaufgeht, um so mehr verwischen sich diese Unterschiede.

Die spezifischen Gewichte und Siedepunkte zeigen keine derartige Eigentümlichkeit.

Die spezifischen Gewichte von C_1 und C_2 sind größer als 1; von C_3 ab sind sie kleiner als das des Wassers und nähern sich asymptotisch einer bei 0,8 liegenden Konstanten.

10. Kurze Zusammenfassung der Reaktionen der Säuren. Zusammenfassend und ergänzend seien zum Schluß die Reaktionen der Säuren hier nochmals zusammengestellt: Verwandlung von Säuren in:

1. → Paraffine: durch Erhitzen der Na-Salze mit Natronkalk; Elektrolyse; durch HJ;
2. → Alkohole: durch Reduktion von Anhydriden und Chloriden;
3. → Aldehyde: wie bei 2 durch gemäßigte Reduktion (Möglichkeit des Aufbaus höherer Säuren durch Addition von HCN), außerdem durch Trockendestillation der Ca-Salze mit Ca-Formiat;
4. → Ketone: durch Trockendestillation der Ca-Salze allein;
5. → Salze: durch Basen;
6. → Ester: mit Alkoholen und wasserentziehenden Mitteln;
7. → Säurechloride: durch PCl_5;
8. → Säureanhydride: durch Säurechlorid (Na-Salz der Säure);
9. → Säureamide, 10. → Nitrile: durch Umwandlung in die NH_4-Salze und Einwirkung mit H_2O-entziehenden Mitteln; Amide auch aus Säurechloriden + NH_3; Genaueres im Artikel „Ammoniakderivate".
11. → Kernsubstituierte Säuren: durch Einführung von Halogen und weitere Umwandlung desselben.

Abbau von Säuren:

a) durch Ueberführung in α-Oxysäure, Oxydation zu α-Ketonsäure und Abspaltung von CO_2;

b) durch Ueberführung in $\Delta\alpha,\beta$-Säure und oxydative Sprengung der Doppelbindung;

c) durch Erhitzen des Ba-Salzes mit Ba-Acetat und oxydative Sprengung des entstehenden Ketons, wobei CH_3COOH und die nächst niedere Säure entsteht

$$C_{17}H_{35}COOH \longrightarrow C_{17}H_{35}COCH_3 \longrightarrow C_{16}H_{33}COOH + CH_3COOH.$$

Abspaltung von CO_2 findet außerdem statt:

1. beim Erhitzen mit konzentrierter H_2SO_4 (tertiäre Säuren, Ameisen- und Oxalsäure geben dabei CO);

2. beim Erhitzen in α-Stelle negativ substituierter Säuren [z. B. mit den Substituenten Cl, NO_2, C_6H_4OH, CO, COOH (Malonsäure und Homologe)], besonders auch von Phenolcarbonsäuren. Dinitrophenylpropiolsäure verliert CO_2 schon unterhalb 0°;

3. bei Elektrolyse von Salzlösungen. In sodaalkalischer Lösung entsteht dabei als Nebenprodukt der Alkohol der nächst niederen Reihe (Umkehrung der Bildung aus Alkoholat + CO_2);

4. bei Einwirkung des Sonnenlichts auf wässerige Säurelösung bei Gegenwart von Uransalz.

11. Säurederivate.

I. Stammsubstituierte Monocarbonsäuren.

Derivate durch Umbildung des Stammes oder Kohlenwasserstoffkerns der gesättigten aliphatischen Monocarbonsäuren.

1. Cyklische Säuren.
2. Ungesättigte Säuren.
3. Mehrbasische Säuren.

4. Halogensubstituierte Säuren: Cl-, Br-, J-, Fl-, CN-Säuren.

5. Sauerstoffsubstituierte Säuren: Oxy-, Aether-, Aldehyd-, Ketonsäuren.

6. Stickstoffsubstituierte Säuren: Amino-, Hydrazino-, Nitrosäuren usw. (sie sind im folgenden übergangen, weil sie im Artikel „Ammoniakderivate usw." besprochen werden).

7. Polysubstituierte Säuren: (Poly-iso-[1]) und Poly-hetero-Substitution[2]).

Entsprechend dem auf S. 776 und 780 Bemerkten werden wir bei am Stamm irgendwie modifizierten Säuren außer den Reaktionen des Carboxyls, die bereits besprochen wurden, und denen des Substituenten, die jeweils an der betreffenden Stelle dieses Buches zu suchen sind, solche erwarten können, die durch gegenseitige Beeinflussung zustande kommen. Nur einiges wird hier dem bereits im allgemeinen Teil erwähnten nachgetragen oder rekapituliert werden. Es ist selbstverständlich, daß die Bildungsweisen solche sein können, die bereits substituierte Produkte zur Säure umbilden, z. B. die Kondensation von zwei Monosubstitutionsprodukten, oder die Einführung eines Substituenten in die Säure. Viele stammsubstituierte Säuren sind zugänglich von den Halogensäuren aus, z. B. ungesättigte durch Abspaltung von Halogenwasserstoff, Oxy- und Aminosäuren durch Austausch des Halogens gegen OH und NH_2, Oxysäuren auch aus Aminosäuren mit HNO_2, Aldehyd- und Ketonsäuren durch Oxydation von Oxysäuren, Nitro- und Sulfosäuren durch Umsetzung mit $AgNO_2$ und mit $NaHSO_3$ usw., Reaktionen, die völlig denen der nichtcarboxylierten Verbindungen gleichen. Dasselbe gilt für die Einführung weiterer Substituenten und das Verhalten der entstehenden Produkte. Die Lösung der Aufgabe, beliebig substituierte Säuren darzustellen, ist indessen nicht so einfach, wie es nach dem vorigen scheinen möchte, weil es bei Säuren ebenso wenig wie bei Kohlenwasserstoffen möglich ist, Halogen in beliebiger Menge an irgendeiner beliebigen Gruppe, auch nicht an der synthetisch bedeutungsvollen ω-Stelle, zu substituieren. Man kann daher oft nicht die Halogensäuren als Ausgangsmaterial nehmen, werden diese doch ihrerseits zum Teil aus anderen, z. B. ungesättigten oder Oxysäuren gewonnen.

[1]) Säuren, die einen Substituenten in Mehrzahl enthalten, sei es a) gehäuft an einem C-Atom; oder b) verteilt auf mehrere, werden zweckmäßig im Anschluß an die einfach substituierten besprochen. Dabei unterscheidet sich Klasse b, die meist nur die Reaktionen des einfachen Substituenten mehrmals zeigt, oft von a, bei der dies häufig nicht der Fall ist.

[2]) Die Zahl der poly-hetero-substituierten Säuren, d. h. solcher, die neben Carboxyl noch 2 oder mehr andere Substituenten enthalten (z. B. Chlornitrobenzoesäure) ist ziemlich beschränkt. Darstellungen und Eigenschaften, soweit gegenseitige Beeinflussung von Carboxyl und Substituent in Frage kommt, ergeben sich aus den früheren Abschnitten, und sollen hier nicht besonders besprochen werden. Ueber die gegenseitige Beeinflussung der außer dem Carboxyl vorhandenen Substituenten ist in den diese behandelnden Abschnitten das nötige ausgeführt.

Die Zahl der Isomeren x-mal substituierter Säuren ist so groß wie die x + 1-mal substituierter, um 1 C-Atom ärmerer Kohlenwasserstoffe.

Anstatt wie gewöhnlich, in der z. B. auch durch die Nomenklatur bevorzugten Weise, Glieder gleicher C-Atomzahl bei der Klassifizierung zusammenzuordnen, kann man zweckmäßiger die Stellung der Substituenten für diesen Zweck benutzen. Gemeinsame oder analoge Bildungsweisen und Verhalten verbinden nicht nur alle Säuren mit gleicher Stellung zweier bestimmter Substituenten zueinander viel näher miteinander, als diejenigen gleicher C-Atomzahl, sondern die Analogien haben auch Gültigkeit mehr oder minder unabhängig von der Art des in die Säure eintretenden Substituenten, wie dies ja für die Gesetzmäßigkeiten der α-, β-, γ-Substitution bereits oben hervorgehoben wurde. Es liegt darin eine Bestätigung des Satzes, daß das Verhalten der Verbindungen, in der organischen Chemie vornehmlich, nicht nur durch Qualität und Quantität der vereinigten Atome bestimmt wird, sondern auch, und zwar oft mehr und bis zu gewissem Grade unabhängig von der Qualität der sich bindenden Elemente, allein durch die Art ihrer Anordnung oder Struktur.

I. Cyklische Säuren. Nur die aromatischen Säuren sollen an dieser Stelle kurz behandelt werden; über sonstige zyklische Säuren von Cyklanen vgl. die Artikel „Naphtene" und „Heterocyklische Verbindungen". Die aromatischen Säuren können das Carboxyl als direkt an den Benzolkern gebundene Seitenkette enthalten (aromatische Säuren im engeren Sinne, z. B. Phenylameisensäure = Benzolcarbonsäure = Benzoesäure) oder sie stellen phenylsubstituierte höhere aliphatische Säuren dar ($C_6H_5CH=CH-COOH$ Phenylakrylsäure = Zimmtsäure).

Uebersicht der möglichen Derivate:

1. C_6H_5COOH, $C_6H_4(COOH)_2$ usw. und deren Kernsubstitutionsprodukte

$$C_6H_4\Big\langle{}^{R}_{COOH} \quad \text{(o-, m-, p-Derivat).}$$

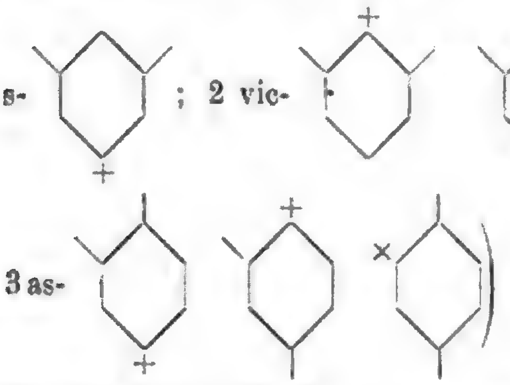
2. $C_6H_5CH_2 \ldots . COOH$. Substitutionsprodukte in Kern und Seitenketten und Homologe.[1])

[1]) Die verschiedene Stellung der Substitu-

3. $C_6H_4\begin{matrix}COOH\\CH_2......COOH\end{matrix}$ und Substitutionsprodukte wie bei 1 und 2.

Nach diesem Schema lassen sich die sehr zahlreichen Isomeren ableiten, z. B. für eine einen Benzolkern enthaltende Säure $C_9H_{10}O_2$ folgende Isomere:

$C_2H_5C_6H_4COOH$ (in o-, m-, p-Form);
$(CH_3)_2C_6H_3COOH$ (in 6 Formen, einer



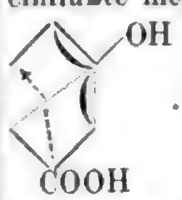
$CH_3C_6H_4CH_2COOH$ (in o-, m-, p-Form);
$C_6H_5CH_2CH_2COOH$;
$C_6H_5\underset{CH_3}{\dot{C}H}COOH$ (mit as-C-Atom).

Die reinen Reaktionen des Carboxyls sind dieselben in den Benzoesäuren, wie bei Bindung von COOH in aliphatischer Seitenkette (Bildung von Säureanhydriden, -chloriden, -amiden; Ketonen beim Glühen der Ca-Salze; Kohlenwasserstoffen beim Glühen mit CaO usw.). Beeinflussungen des Carboxyls durch andere Kernsubstituenten zeigen sich in der — wahrscheinlich sterischen — Hinderung der Veresterung auf gewöhnlichem Wege bei Benzoesäuren, die doppelt o-substituiert sind. Ester der 1,2,6 Dibrombenzoesäure z. B. können nur auf dem Wege über das Ag-Salz mit Jodalkyl erhalten werden.

Die Eigentümlichkeiten des Benzolkerns andererseits — Nitrierbarkeit, Sulfurierbarkeit usw. — und sein Einfluß auf Reaktivität des Kohlenwasserstoffrestes der Seitenkette — „negativer Charakter" der Phenylgruppe — sind in den Säuren erhalten. Der gegenseitige Einfluß von COOH-Gruppe und Kohlenwasserstoffrest zeigt sich z. B. in der gegenüber den Kohlenwasserstoffen leichteren Hydrierbarkeit von C=C-Doppelbindungen der Säuren, mögen sie die Doppelbindung im Kern oder in der Seitenkette enthalten (Zimtsäure ⟶ Hydrozimtsäure; Benzoesäure ⟶ Hydrobenzoesäure). Im übrigen sind indessen die Verschiedenheiten der echten aromatischen, von den aromatisch-substituierten aliphatischen Säuren zahlreich.

Für die Seitenketten der Säuren vom Typus 2 und 3 mit ihren Substituenten im Verhältnis zum Carboxyl gelten dieselben Beziehungen der α-, β-, γ-Stellung, wie in der aliphatischen Reihe. Sie werden auch ganz wie aliphatische Säuren gewonnen, z. B. aus Halogeniden + KCN durch nachfolgende Verseifung. Sie beeinflussen die Reaktion des Benzolkerns kaum mehr als irgendwelche Alkylseitenketten. Für die α-, für die β- (= ortho-), γ- (= meta-), δ- (= para-) Stelle des Benzolkerns, vom Carboxyl der Benzoesäure aus gerechnet, gelten dagegen die besonderen, der aromatischen Reihe eigenen Gesetzmäßigkeiten (vgl. den Artikel „Aromatische Reihe") und es werden hier vergleichend zu betrachten sein die Besonderheiten o-, m- und p-substituierter Benzoesäuren.[1]) COOH drängt als Substituent zweiter Klasse (vgl. S. 916) weitere eintretende Substituenten, gleichviel welcher Art diese sind, vorwiegend in die meta-Stelle des Kerns[2]) und erschwert die weitere Substitution, z. B. die Nitrierung. o- und p-Derivate der Benzoesäure werden nicht aus dieser gewonnen, sondern auf anderem Wege, z. B. o-Cl-Benzoesäure durch Oxydation von o-Cl-Toluol, o-oxy-Benzoesäure oder Salicylsäure aus Phenol + CO_2, Aminobenzoesäure durch Reduktion der Nitrosäuren usw.

Bei Einführung eines dritten Substituenten in den Kern können sich die platzbestimmenden Einflüsse der ersten beiden widerstreiten. Z. B. erstreckt sich in der o- und p-Oxybenzoesäure zwar der Einfluß von OH und COOH auf dieselben beiden Stellen, die zum Carboxyl beide m-, zum OH aber o- oder p-Stellung einnehmen; bei der meta-oxy-Säure dagegen beeinflußt OH zwei o- und eine p-Stelle; während die von COOH beeinflußte meta-Stelle davon verschieden ist.



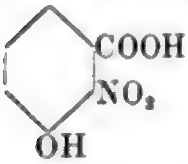
. Es zeigt sich, daß in solchen Fällen der Einfluß von COOH zurücktritt und nur die OH-Gruppe den Platz bestimmt.

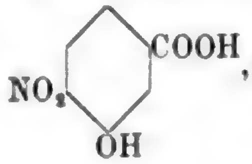
enten kann man nach v. Baeyer (Ber. Chem. Ges. 17, 963) kurz unterscheiden durch den Zusatz endo- (d. h. im Kern substituiert) und exo-.

[1]) Die verschiedene Art der Kernsubstitution beeinflußt übrigens auch bei Säuren vom Typus 2 die Reaktionen des Kohlenwasserstoffteils der Seitenkette, z. B. die Additionsfähigkeit von Doppelbindungen darin in deutlicher, wenn auch im einzelnen nicht geklärter Weise (vgl. z. B. Ann. 389, 1ff.).

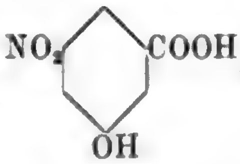
[2]) Substituenten vom Typus CH_2COOH oder CHRCOOH dagegen beeinflussen o- und p-Stelle und sind daher solche erster Klasse.

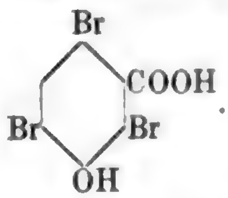
Nächst OH hat NH_2 den größten Einfluß. In ähnlicher Weise vermag OH als substitutionerleichternde Gruppe den gegenteiligen Einfluß der COOH-Gruppe, z. B. hinsichtlich der Nitrierbarkeit zu paralysieren, und zwar mit von den meta- zu den ortho-Verbindungen abnehmender Leichtigkeit. m-Oxybenzoesäure ist schon durch verdünnte HNO_3 im Ringe nitrierbar, wobei



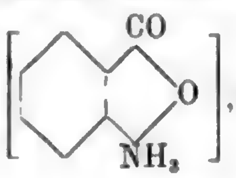
und


, daneben

aber auch


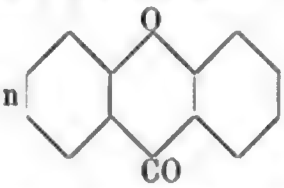
entstehen. Mit Bromwasser entsteht ähnlich leicht wie bei Phenol selbst


.

Den echten aromatischen Säuren (vgl. oben Typus 1) eigentümlich sind Abspaltungen in ortho- (= β-) Stelle unter Ringschluß, die die aliphatische Reihe nicht kennt. Von der ortho-Aminosäure oder Anthranilsäure z. B., die wie das Glykokoll als cyklisches Ammonsalz aufgefaßt werden kann


, existiert ein, allerdings nur auf Umwegen erhältliches Anhydrid „Anthranil"


. Auch die o-Oxysäure (Salicylsäure)


COOH ist der H_2O-Abspaltung fähig. Dabei kann entstehen Salicylid $(C_6H_4O.CO)_4$ oder ein hochmolekulares Polymeres davon (Polysalicylid) oder unter gleichzeitiger CO_2-Abspaltung Xanthon


(vgl. S. 806).

Die o-Amino-Carbonsäuren der aromatischen Reihe sind mehrerer derartiger Ringschliessungen fähig. Solche Abspaltungsprodukte mannigfacher Art, z. B. 2 Mol. — 1 H_2O, 4 Mol. — 3 H_2O, 8 Mol. — 7 H_2O, sind übrigens von o-, m- und p-substituierten Benzoesäuren beschrieben. Sie sind zum Teil von merkwürdiger Beständigkeit selbst gegen konzentrierte warme Alkalilaugen und lassen sich bisweilen unverändert, d. h. ohne wieder H_2O aufzunehmen, aus ihren Salzlösungen mit Säure wieder abscheiden. Beim Destillieren zerfallen sie: die o-oxy-Säureanhydride bilden alle Salicylsäure und Phenol zurück neben anderen Zerfallprodukten. Sie werden zum Teil als ringförmige Anhydride anzunehmen sein, z. B. m-Aminobenzoid

$$C_6H_4\begin{matrix}\diagup CO-NH \diagdown \\ \diagdown NH-CO \diagup\end{matrix}C_6H_4$$

; zum Teil als nach Art der Polypeptide (vgl. S. 782) konstituiert, z. B.

$$COOHC_6H_4-O-COC_6H_4-O-COC_6H_4O-COC_6H_4OH$$

Tetra-p-oxy-benzoid

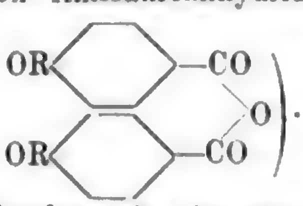
$$NH_2C_6H_4CONHC_6H_4COOH$$

m-Aminobenzoesäureanhydrid.

Zum Teil sind sie wohl einfach als Polymere aufzufassen. Anhydride wie

$$\begin{matrix}OHC_6H_4CO \\ OHC_6H_4CO\end{matrix}\!\!>O$$

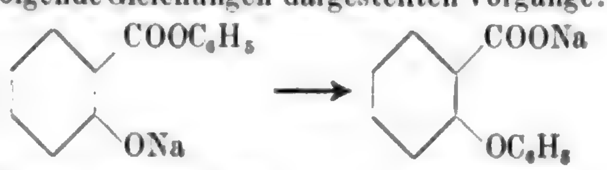
sind nicht bekannt, die Hydroxylgruppe nimmt immer intra- oder intermolekular an der Anhydrisierung teil (vgl. dagegen die Existenz von Anissäureanhydrid



).

Ueber Xanthon als Abspaltungsprodukt von 2 Mol. Salicylsäure vgl. oben.

Beispiele anderer intramolekularer Reaktionen zwischen den Substituenten sind jene Umlagerungen, bei denen 2 Bestandteile den Platz tauschen, z. B. die durch folgende Gleichungen dargestellten Vorgänge:



Na-Verbindung des Salols[1]) — Phenylsalicylsaures Na;

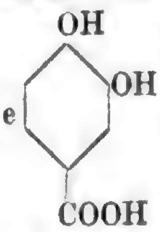
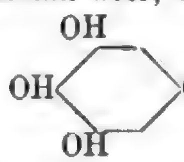
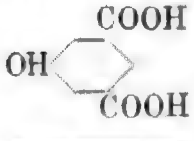
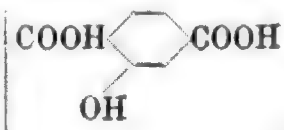
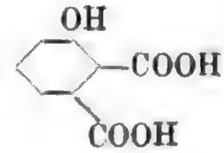
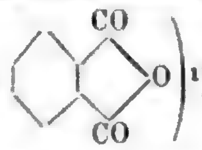
$$HOC_6H_4COOR \xrightarrow{+Na} ROC_6H_4COONa + H,$$

---

[1]) Salol oder Salicylsäurephenylester, be-

d. h. die unter Einwirkung von Natrium erfolgende Bildung einer Aethersäure aus dem Ester der oxy-Säure. Von den Oxybenzoesäuren (vgl. S. 805) ist nur die ortho-Verbindung mit H_2O-Dampf flüchtig, löslich in kaltem Chloroform und gibt eine Violettfärbung mit $FeCl_3$ [1]) und zwar auch in stark verdünnter, auch alkoholischer Lösung. Die p-oxy-Säure gibt einen gelben Niederschlag mit $FeCl_3$, die m-Säure reagiert gar nicht. Die Reaktion erfolgt unter dem Einfluß des Carboxyls auf das OH des Phenols, da dieses sich ebenfalls, aber nur in H_2O-Lösung, also in einem stärker dissoziierenden Medium, und in nicht zu verdünnter Lösung mit $FeCl_3$ färbt.

Die Phenolreaktionen sind in den Phenolsäuren im übrigen wenig oder nicht verändert. Das OH ist durch Halogen substituierbar mittels PCl_5 — wenn auch nicht immer leicht —, nicht aber mittels HCl. Es ist acidylierbar durch Säurechloride, alkylierbar durch Jodalkyl + KOH. Die entstehenden Aethersäuren und Aethersäureester sind sehr beständig (und erst durch KOH-Schmelze oder durch HJ zersetzbar), außer wenn sie im Kern eine Nitrogruppe enthalten.

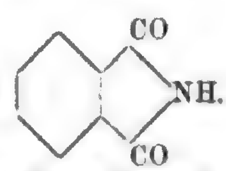
Die o- und p-OH-, auch die o-NH_2-Säuren spalten sehr leicht CO_2 ab,[2]) die meta-Säure viel schwerer, sie destilliert noch unzersetzt. Die Leichtigkeit der Abspaltung wächst mit der Zahl vorhandener OH-Gruppen. Protocatechusäure  geht erst oberhalb ihres Schmelzpunktes in Brenzkatechin über, der Uebergang von Gallussäure  in Pyrogallol + CO_2 erfolgt schon beim Schmelzen. Bei Mehrzahl der COOH-Gruppen ist das Verhalten je nach der Stellung verschieden.  ist unzersetzt sublimierbar,  verliert leicht das orthoständige CO_2,  bildet ein Anhydrid. Durch Erhitzen geht das Kalium-Salz der o-Oxysäure in die para-Verbindung über. Das mono-Na-Salz der para-Säure geht bei 250° über in Dinatriumsalz, wobei zugleich CO_2 und Phenol als Zersetzungsprodukte der daneben gebildeten freien p-Oxysäure auftreten. Das Na-Salz der meta-Säure wird erst in sehr hoher Temperatur zersetzt. Natrium (+ Amylalkohol) reduziert die ortho-Säure unter Einwirkung auf den Benzolkern zu n-Pimelinsäure (C_7), die meta-Verbindung dagegen (in Form von Natriumamalgam) zum dazugehörigen Alkohol $OHC_6H_4CH_2OH$. — Hinsichtlich der Beständigkeit bei allen möglichen Reaktionen ordnen sich die Oxybenzoesäuren nach der Reihenfolge m > p > o. Nach der Stärke der Säure ist ihre Reihenfolge o > m > p. Die Benzoesäure selbst steht ihrer Stärke nach zwischen m und p. Die eigentlichen Benzoesäuren sind tertiäre Säuren, d. h. das mit COOH verbundene C-Atom trägt keinen Wasserstoff mehr; sie sind daher unfähig aller Reaktionen, bei denen die α-Wasserstoffe beteiligt sind. Von den mehrwertigen Benzolcarbonsäuren existiert die zweiwertige Säure, die **Phtalsäure**, wie alle Diderivate des Benzols in 3 Formen: gewöhnliche oder o-Phtalsäure (bildet leicht ein Anhydrid  [1]), para- oder Terephtalsäure (sublimiert unzersetzt), schließlich meta- oder iso-Phtalsäure. Die tri-Säure existiert als s-, as-, vic- ebenso wie alle Triderivate des Benzols. Alle diese Säuren entstehen durch Oxydation der Seitenketten von Benzolderivaten. Die Oxydation erfolgt bei o-dialkylierten Derivaten im Gegensatz zu den m- und p-Verbindungen, derart leicht, daß sie mit CrO_3 gleich zu CO_2 und H_2O verbrannt werden, so daß man auf Anwendung milderer Oxy-

---

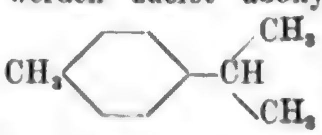
kanntes Antiseptikum, entsteht durch Erhitzen von Salicylsäure, unter Abspaltung von CO_2 und H_2O, unter geeigneten Bedingungen.

[1]) Den gleichen Unterschied zeigt auch o-oxyphenylessigsäure von der m- und p-Verbindung. — $HOOC.C_6H_4OR$ zeigt keine $FeCl_3$-Färbung.

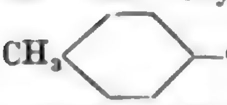
[2]) Abspaltung aus o- und p-oxy-Säure auch mit konzentrierter HCl, aus o-Säure auch mit Anilin.

[1]) Und Imid  Synthetische Wichtigkeit desselben siehe S. 811. Ueber Phtalylchlorid und Phtalid (unsymmetrische Formel desselben) vgl. S. 811.

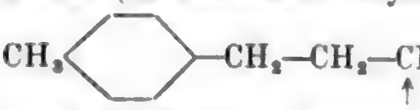
dationsmittel (z. B. $KMnO_4$) angewiesen ist. Sind mehrere verschiedene Seitenketten vorhanden, so wird erst ein vorhandenes CH oxydiert, nächstdem ein CH_2 und erst zuletzt eine Methylgruppe, d. h. die längeren Seitenketten werden zuerst aboxydiert. Das Cymol



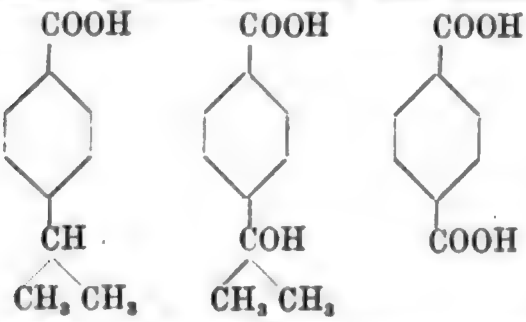
geht daher bei der Oxydation zuerst über in



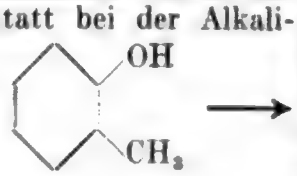
para-Toluylsäure. Die endständige Methylgruppe einer Seitenkette kann man im allgemeinen nicht oxydieren (Ausnahmefall: Oxydierbarkeit von

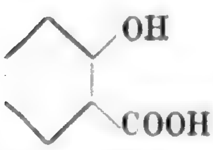


zum Aldehyd an der ↑ Stelle). Dagegen sind natürlich Säuren wie $C_6H_5CH_2CH_2COOH$ weiter oxydierbar, wobei wohl immer intermediär das !C-Atom die Alkohol- und Ketonstufe durchläuft. Bei Cuminsäure verläuft die Oxydation nachweislich nach dem Schema



Bei der Oxydation der Zimmtsäure entsteht nachweislich intermediär zuerst Benzaldehyd. Oxydation der Seitenkette in anderem Sinn kann auch bei tertiärem C-Atom erfolgen, wenn dieses nicht dem Kern benachbart ist. $C_6H_5CH_2CH(CH_3)COOH$ geht in heißer konzentrierter Schwefelsäure gelöst leicht über in $C_6H_5CH_2COCH_3 + CO_2$. Aehnliches gilt für $ClC_6H_4CH_2CH_2COOH$. — Eine Oxydation der Seitenkette durch den Luftsauerstoff findet statt bei der Alkalischmelze der Kresole





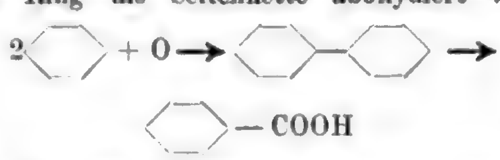
. Wie eine Seitenkette verhält sich gegenüber Oxydationsmitteln der eine von 2 kondensierten Ringen, z. B. im Naphtalin, als dessen Oxydationsprodukt die Phtalsäure ihren Namen erhalten hat. Da die 3 Phtalsäuren charakteristisch voneinander unterschieden sind, so wird der oxydative Abbau von Seitenketten benützt, um ihre Stellung im Kern zu bestimmen. — Nitrogruppen erschweren die Oxydierbarkeit einer Seitenkette, besonders einer solchen in ortho-Stellung („schützender Einfluß der Nitrogruppe auf benachbarte Alkyle")[1].

Die Substitution durch Halogen erstreckt sich bei aromatischen Säuren mit Vorliebe auf die Wasserstoffe des Benzolkerns. Nur bei höherer Temperatur, im Sonnenlicht und bei Gegenwart bestimmter „Seitenkettenüberträger" tritt Halogen in die Seitenkette. Während so gebundenes Halogen kein von den aliphatischen Verbindungen abweichendes Verhalten zeigt, reagiert direkt am Kern gebundenes Halogen auch in der Säure, wie in den Kohlenwasserstoffen, schwer. Die durch direkte Halogeneinwirkung oder auch aus den oxy-Säuren mit PCl_5 gewinnbaren Halogenbenzoesäuren tauschen ihr Halogen schwer aus, z. B. nicht gegen NH_3; gegen OH erst bei KOH-Schmelze. Dabei sind Umlagerungen nicht ausgeschlossen, z. B. entsteht m-oxy-Benzoesäure auch aus dem o-Cl-Derivat. — Nicht so erschwert ist die Reaktivität positiver Gruppen, z. B. von NH_2. Aminosäuren sind z. B. in gewöhnlicher Weise mit HNO_2 in Oxysäuren überführbar. — Die Nitrogruppe kann nicht direkt in die Seitenkette eingeführt werden, sondern geht immer in den Kern.

Aromatische Säuren mit aliphatischer carboxylierter Seitenkette setzen sich um wie die rein aliphatischen Säuren. Eigentümlich sind ihnen die unter Ringbildung erfolgenden Abspaltungsreaktionen. Für die aromatischen Säuren im engeren Sinne kommen einige spezielle Bildungsweisen in Betracht, während von den in der aliphatischen Reihe üblichen die über die Halogen- und Cyan- zur Carboxylverbindung verlaufende nicht ausführbar ist wegen der Festigkeit des an C_6H_5 tertiär gebundenen Halogens.[2]) Den Säuresynthesen mittels CO_2 oder CO_2-Derivaten (vgl. S. 776) entsprechend gewinnt man Benzoesäure:

---

[1]) Die merkwürdig erscheinende Möglichkeit durch Oxydation aus Benzol Benzoesäure zu erhalten, erklärt sich wahrscheinlich durch intermediäre Entstehung von Diphenyl, dessen einer Ring als Seitenkette aboxydiert wird.



[2]) Bei hohen Temperaturen erhält man die Cyanide z. B. aus

$C_6H_5J + AgCN$; $C_6H_5Br + K_4Cy_6Fe$

aus $C_6H_5Br + Na + CO_2$ oder $ClCOOR$
aus $C_6H_6 + COCl_2$ (oder $ClCN$) + $AlCl_3$.

Die wichtigste Bildungsweise, zugleich den Benzoesäuren eigentümlich, ist die bereits erwähnte in der aliphatischen Reihe nicht ausführbare Oxydation der CH_3-Gruppe zu COOH:

$$C_6H_5CH_3 \longrightarrow C_6H_5COOH.$$

Eine weitere spezifisch aromatische Reaktion ist die Bildung von Säuren aus Aminen über die Diazo-Verbindungen[1]): $C_6H_5NH_2 \longrightarrow C_6H_5N_2Cl \longrightarrow C_6H_5CN \longrightarrow C_6H_5COOH$. Synthesen der Salicylsäuren siehe unten bei den Oxysäuren.

Die aromatischen Säuren sind alle fest, gut kristallisierbar, schwer löslich in Wasser, leicht in Alkohol und Aether, flüchtig mit H_2O-Dampf. Sie haben alle hohen Siedepunkt. Siedepunktregelmäßigkeiten sind nicht bekannt. Sie sind ziemlich häufige Bestandteile der Pflanzen, besonders der Harze. Meist kommen sie als Ester (oder Laktone) vor. Auch bei der Eiweißfäulnis treten aromatische Säuren auf. Physiologisch wichtige Derivate sind Hippursäure oder Benzoylglykokoll, Tyrosin; vgl. Abschnitt **12**.

Unter den aromatischen Oxysäuren unterscheiden sich die Alkoholsäuren von den Phenolsäuren durch viel größere Löslichkeit in Wasser und geringere Beständigkeit.

2. Ungesättigte Säuren. Einfach ungesättigte Säuren (En-Säuren, Olefincarbonsäuren, Akrylsäure- oder Oelsäurereihe):

$\Delta\alpha\beta$-, $\Delta\beta\gamma$-, $\Delta\gamma\delta$- usw. Säuren.

Mehrfach ungesättigte Säuren: Diën-, Triën-, Polyënsäuren. In-Säuren (Acetylencarbonsäuren).

Einzelne Glieder siehe im Abschnitt **12**.

Durch Anwendung der gewöhnlichen Methoden der Säurebildung bei Verwendung von ungesättigtem Ausgangsmaterial gelingt es nicht, ungesättigte Säuren darzustellen, da die doppelte Bindung gegen alle oxydierenden oder verseifenden Mittel zu empfindlich ist. Man kann dagegen Doppelbindungen in das Molekül gesättigter Säuren einführen durch Abspaltungen in bekannter Weise, und zwar innerhalb eines Moleküls sowohl, wie zwischen zweien, durch deren Kondensation die Doppelbindung entsteht. $\Delta\alpha\beta$-Säuren (Typus Akrylsäure $CH_2{=}CH{-}COOH$) erhält man z. B. aus den β-Halogen oder oxy-substituierten Säuren durch Abspaltungen oder aus den $\alpha\beta$-disubstituierten Derivaten durch Reduktion. Auch α-Mono-Substitutionsprodukte, besonders tertiäre, können bisweilen verwandt werden,

z. B. $\begin{matrix}CH_3\\CH_3\end{matrix}\!>COH{-}COOH \longrightarrow \begin{matrix}CH_2\\CH_3\end{matrix}\!\!\geqslant C{-}COOH$

Da die normalen Säuren direkt an der α-Stelle bromierbar sind (vgl. S. 801), kann man sie auf diesem Wege in $\alpha\beta$-ungesättigte verwandeln, wobei allerdings $\beta\gamma$-Ensäuren als Nebenprodukt entstehen. Ebenso entstehen Säuren beiderlei Art aus den β-oxy-Säuren beim Kochen mit NaOH:

$$RCH_2{-}CHOH{-}CH_2{-}COOH \begin{matrix}\nearrow RCH{=}CH{-}CH_2COOH\\ \searrow RCH_2{-}CH{=}CHCOOH.\end{matrix}$$

Dagegen verläuft die Reaktion natürlich nur in einem Sinne, wenn die benachbarte Methylengruppe dialkyliert ist: $RCH_2CHOH{-}CR_2COOH \rightarrow RCH{=}CH{-}CR_2COOH$.

Aus halogenisierten Bernsteinsäuren (Halogen zu einem Carboxyl in α-, zum anderen in β-Stellung) entsteht mit Soda eine $\alpha\beta$-Ensäure

$$\begin{matrix}RCBr{-}COONa\\ |\\ CH_2COONa\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}RC{-}COONa\\ \|\\ CH_2\end{matrix} + NaBr + CO_2.$$

Aus α-Amidosäuren kann man durch fortgesetzte Methylierung (mit Jodmethyl) und Abspaltung zu En-Säuren gelangen; von der α-Amidopropionsäure zur Akrylsäure. Säuren vom Typus $COOH{-}CR{=}CH_2$ sind auch gewinnbar aus

[1]) Als weniger wichtig seien noch erwähnt die durch die folgenden Formelbilder angedeuteten Reaktionen:

1) $HCOOH + C_6H_5NH_2 \rightarrow HCONHC_6H_5 \rightarrow$ Formanilid
$C_6H_5NC + H_2O \rightarrow C_6H_5CN \rightarrow C_6H_5COOH$
(an Stelle von Ameisensäure kann auch Oxalsäure verwandt werden, die beim Erhitzen Ameisensäure bildet).

2) C_6H_5NCS (Phenylsenföl) $+ Cu \rightarrow CuS + C_6H_5NC \rightarrow C_6H_5CN \rightarrow C_6H_5COOH$

3) $C_6H_5SO_3K + HCOONa \rightarrow C_6H_5COONa + KHSO_3$

4) $C_6H_5SO_3K + KCN \rightarrow C_6H_5CN + K_2SO_3$

Ketonen durch Addition von HCN, H_2O-Abspaltung und Verseifung $\frac{CH_3}{R}\!>\!C\!<\!\frac{OH}{CN} \longrightarrow \frac{CH_3}{R}\!>\!C{-}COOH$. Die β-oxy-Säuren entstehen als Zwischenprodukte bei der sogenannten Perkinsynthese: Aldehyde vermögen mit Verbindungen, die die Gruppe CH—CO enthalten, z. B. mit Carbonsäuren (in Form ihrer Alkalisalze) zu reagieren unter Addition von deren α-Wasserstoffen an den Aldehydsauerstoff. Sekundär spaltet sich Wasser ab unter Bildung einer $\Delta\,\alpha\beta$-Säure. Die Reaktion ist besonders anwendbar in der aromatischen Reihe, d. h. ausgehend vom Benzaldehyd

$$C_6H_5C{}^{H}_{O} + HCH_2{-}COONa \longrightarrow$$
$$C_6H_5CHOH{-}CH_2COONa \longrightarrow$$
β-Phenylmilchsäure
$$C_6H_5CH{=}CH{-}COONa$$
Zimtsäure.

In ähnlicher Reaktion geben die Additionsprodukte von Aldehyd an Malonester[1]) unter H_2O- und CO_2-Verlust $\alpha\beta$-Ensäuren:

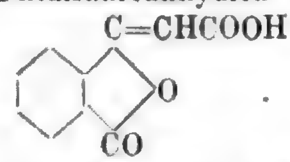
$$RC{}^{H}_{O} + HCH{<}^{COOR}_{COOR} \longrightarrow RC{}^{H}_{OH}{-}CH{<}^{COOR}_{COOR} \longrightarrow RCH{=}CR.COOR + CO_2$$

Alkylidenmalonester.

Nimmt man, wie gewöhnlich, Acetanhydrid als H_2O-entziehendes Mittel bei der Perkin-Synthese, so entsteht jedenfalls intermediär ein später wieder Essigsäure abspaltendes Acetat

$$C_6H_5CH(OCOCH_3)CH_2COOH.$$

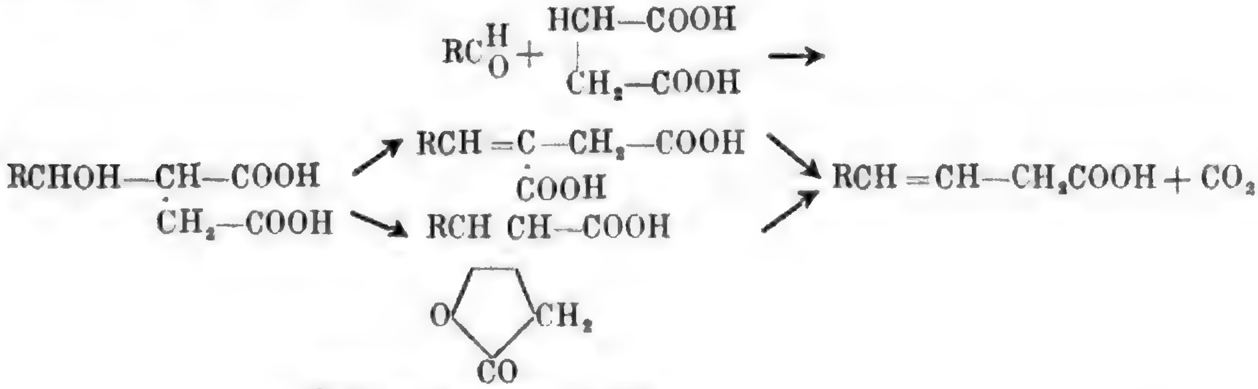
Ist nämlich das α-C-Atom dialkyliert, — so daß Essigsäure nicht austreten kann —, so erhält man in der Tat ein solches Acetat. Das CO der Säureanhydride ist der Perkinschen Kondensation ebenso zugänglich wie das der Aldehyde; so erhält man aus Phtalsäureanhydrid die Säure



$\Delta\,\beta\gamma$-Säuren sind nicht gewinnbar aus Aldehyden mit Propionsäure etwa entsprechend der Gleichung

$$RC{}^{O}_{H} + HCH_2CH_2COOH \longrightarrow RCH{=}CH{-}CH_2COOH,$$

da nur α-Atome addierbar sind; dagegen, analog der zweiten oben für $\Delta\,\alpha\beta$-Säuren genannten Bildung, aus Aldehyd + Bernsteinsäure (Na-Salz + Acetanhydrid). Das erste Additionsprodukt enthält CHOH zu einem Carboxyl in β-, zum anderen in γ-Stellung. Dementsprechend kann die H_2O-Abspaltung vorübergehend in verschiedenem Sinne verlaufen, führt aber schließlich unter Abgabe von CO_2 zum selben Endprodukt.



alkylierte Paraconsäure[2])

[1]) Aldehyd kann sich auch mit 2 Mol. Malonester kondensieren zu $RCH{<}^{CH(COOR)_2}_{CH(COOR)_2}$

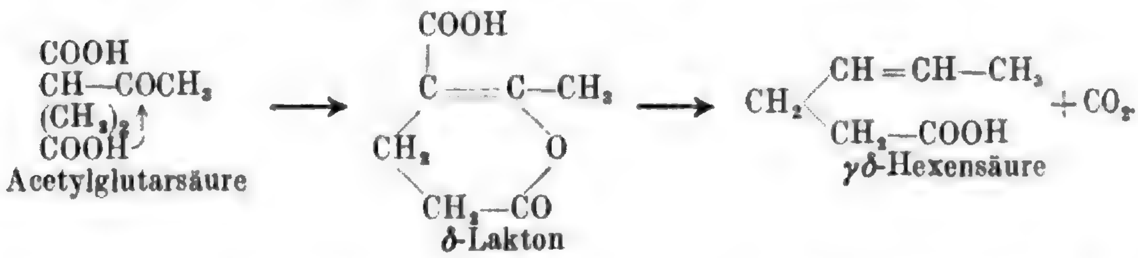
[2]) Paraconsäure = oxy-Brenzweinsäure oder oxy-Methyl-Bernsteinsäure. Brenzweinsäure = $COOH{-}\underset{CH_3}{CH}{-}CH_2{-}COOH$.

$\Delta\beta\gamma$-Säuren entstehen bisweilen auch aus doppelt ungesättigten Säuren mit „konjugiertem System" durch H-Addition in 1,4-Stellung

$$RCH{=}CH{-}CH{=}CH{-}COOH \longrightarrow RCH_2{-}CH{=}CH{-}CH_2{-}COOH.$$

Die Methylengruppe in $\Delta\beta\gamma$-Säuren ist besonders reaktiv, z. B. im Glutaconsäureester $COORCH{=}CH{-}CH_2{-}COOR$ (vgl. S. 786).

$\Delta\gamma\delta$-Säuren sind zugänglich analog den obigen Bildungen der $\alpha\beta$- und $\beta\gamma$-Säure von der Glutarsäure aus:



Es ist auch möglich, einzelne der Klassen durch Verschiebung der Doppelbindungen ineinander überzuführen; z. B. $\Delta\alpha\beta \longrightarrow \Delta\beta\gamma$ durch abwechselnde Einführung von Halogen und Wiederabspaltung (vgl. den Artikel „Aliphatische Kohlenwasserstoffe".

$$RCH_2CH_2CHBrCOOH \xrightarrow{+\ \text{Chinolin}} RCH_2CH{=}CHCOOH \xrightarrow{+\ HBr}$$
$$RCH_2CHBr{-}CH_2COOH \longrightarrow RCH{=}CH{-}CH_2COOH$$

Eine Wanderung der Doppelbindungen im entgegengesetzten Sinne zur COOH-Gruppe hin ist häufig zu beobachten, z. B. unter der Einwirkung von Alkali (Kochen mit Lauge, alkalische Schmelze vgl. unten). Aus Allyljodid entsteht z. B. mit KCN-Crotonsäure:

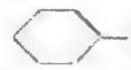
$$CH_2{=}CH{-}CH_2J \longrightarrow CH_2{=}CH{-}CH_2CN \longrightarrow CH_3{-}CH{=}CH{-}COOH.$$

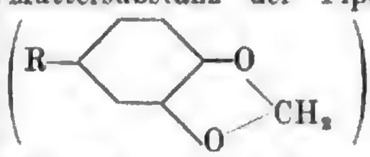
Vinylessigsäure mit 5-prozentiger H_2SO_4 gekocht wird ebenfalls in Crotonsäure umgelagert:

$$CH_2{=}CH{-}CH_2COOH \longrightarrow CH_3{-}CH{=}CHCOOH.$$

Solche Umwandlungen sind entsprechend der Bildung des konjugierten Systems $C{=}C{-}C{=}O$ aus dem nicht konjugierten $C{=}C{-}CH_2{-}C{=}O$ mit thermischem Energieverlust verbunden, worin wohl das treibende Moment dieser eigentümlichen Reaktion zu erblicken ist.

Die Gewinnung von Di-en-säuren, von En-di-säuren, Diën-disäuren usw. bietet nichts wesentlich Neues. Alle diese Körperklassen besitzen hohes praktisches und theoretisches Interesse. Glyceride von Di- und Tri-en-Säuren sind Bestandteile der sogenannten trocknenden Oele (Leinöl, Mohnöl u. a.). Sie trocknen in dünner Schicht an der Luft allmählich zu einer harten, elastischen Masse und werden bekanntlich deswegen als Firnisse verwandt.[1]) Ihr Verhalten ist von diesem Gesichtspunkt aus eingehend studiert worden, ohne bis in alle Einzelheiten aufgeklärt zu sein (den Artikel „Fette, Oele, Seifen"). Weiterhin knüpfen die Spekulationen vieler Forscher über die Natur der Doppelbindungen (einfachen und konjugierten) vielfach an das Verhalten der ungesättigten Säuren an.[1])

Zur Sorbinsäure $CH_3{-}CH{=}CH{-}CH{=}CH{-}COOH$, die auch im Safte der Vogelbeeren vorkommt, gelangt man vom Crotonaldehyd (C_4) aus durch Kondensation mit Malonester, zur Muconsäure (= Butadiendicarbonsäure) von der Schleimsäure $COOH(CHOH)_4COOH$ aus. Cinnamenylakrylsäure $C_6H_5{-}CH{=}CH{-}CH{=}CH{-}COOH$ (abgekürzt —R) ist Muttersubstanz der Piperinsäure



; piperinsaures Piperidin ist das Alkaloid des schwarzen Pfeffers und wird Piperin genannt.

In-Säuren sind zugänglich durch Addition von CO_2 an die Acetylen-Metall-Verbindungen $CH_3{-}C{\equiv}CNa + CO_2 \longrightarrow CH_3C{\equiv}C{-}COONa$, tetrolsaures Na, $C_6H_5{-}C{\equiv}C{-}COONa$ phenylpropiolsaures Na (vgl. den Artikel „Indigo").

Die Hydrierung der Doppelbindung ist wie überall durchführbar durch HJ + P (über Einwirkung dieser Reagentien auf die

[1]) Auch zur Bereitung von Kitten (Glaserkitt).

[1]) Vgl. Ann. 306, 87 ff. — Die En-disäuren sind hier unter den mehrwertigen Säuren behandelt.

COOH-Gruppe selbst vgl. S. 781.) Außerdem sind sie allgemein reduzierbar, elektrolytisch und bei Gegenwart geeigneter Katalysatoren: Durch Natriumamalgam, das sonst gewöhnlich nur die C=O-Gruppe angreift, nicht aber Aethylendoppelbindungen, sind im allgemeinen nur $\Delta\alpha\beta$-Säuren reduzierbar[1]), $\beta\gamma$ dagegen nicht. Diese letzteren entstehen vielmehr als Endprodukte bei der Hydrierung von Diensäuren mit konjugierten Systemen. Bei Reduktion mit Na und Alkohol gehen die über in ungesättigte Alkohole ($\Delta\alpha\beta$-Säuren geben damit entsprechend gesättigte Alkohole). Die Leichtigkeit der H-Anlagerung an $\alpha\beta$ wird wesentlich erhöht durch ein zweites Carboxyl in Nachbarschaft: Fumar- und Maleinsäure sind viel leichter reduzierbar als Crotonsäure.[2])

Auch die sonst nur an CO-Doppelbindung stattfindende Addition von HCN und NH_3 tritt unter dem Einfluß des Carboxyls an der C=C-Bindung mancher ungesättigter Säuren ein, z. B. geht die Konfiguration

$$RCH{=}C\begin{matrix}\diagup COOH\\ \diagdown COOH\end{matrix} \text{ über in } \underset{\text{½ Nitril der Bernsteinsäure.}}{CN{-}CHR{-}CH_2{-}COOH} + CO_2$$

Akrylsäure (in Form ihres Esters) addiert NH_3 im Gegensatz zum Propylen. Von großer praktischer Bedeutung für die Seifen- und Kunstspeisefettindustrie ist die neuerdings mit geeigneten Katalysatoren durchführbar gewordene Hydrierung der höheren ungesättigten Säuren zu gesättigten, die sich vor jenen durch Geruch- und Geschmacklosigkeit und festere Konsistenz auszeichnen.

Vorsichtige Oxydation verwandelt die Ensäuren in gesättigte Dioxysäuren, durch weitergehende oxydative Spaltung entstehen 2 Moleküle einbasischer Säuren. Aus der Art der Spaltstücke kann der Ort der Doppelbindung ermittelt werden. Die früher für diesen Zweck benützte Kalischmelze ist indessen nur mit Vorsicht zu gebrauchen, weil der Spaltung eine Wanderung der Doppelbindung vorhergehen kann. Dasselbe gilt für die bei Kochen mit Lauge unter Aufnahme der Bestandteile des Wassers erfolgende Bildung von Oxysäuren. Auf die Halogenaufnahmefähigkeit der Doppelbindung der Oelsäure stützt sich die in der Analyse der Fette viel angewandte Bestimmung der „Jodzahl“ (vgl. den Artikel „F e t t e u n d O e l e“). — Von der in den höheren Gliedern ungesättigter Säuren außerordentlich großen Zahl von Isomeren sind relativ wenige bekannt. Die im Artikel „K o h l e n w a s s e r s t o f f e“ bereits erwähnte Stereoisomerie entsprechend dem Schema $\begin{matrix} a & c & b \\ \hline & | & \\ a & c & b\end{matrix}$ ist besonders bei den Crotonsäuren und bei F u m a r - und M a l e i n säure studiert worden.

Physikalische und chemische Einflüsse begünstigen gewöhnlich eine der stereoisomeren Formen, die oft dem eventuell in der Natur vorkommenden Gebilde entspricht und die durch Erhitzen oder mit Agentien wie H_2SO_4, NaOH, HNO_2 oft aus dem anderen entsteht, z. B.

Oelsäure (flüssig) + HNO_2 → Elaidinsäure (fest)
(analytisches Merkmal).

Die Ensäuren sind den Ansäuren physikalisch sehr ähnlich, zeigen aber ihnen gegenüber zum Teil namhafte Schmelzpunktdifferenzen. Mit Ausnahme der flüssigen Akrylsäure sind sie meist fest. Daß der Schmelzpunkt hier weniger durch die C-Atomzahl, als durch die Konstitution beeinflußt wird, zeigt das Beispiel der flüssigen Oelsäure (C_{18}). — Mit überhitztem Dampf sind die Säuren zum Teil flüchtig.

3. Mehrbasische Säuren. Uebersicht: 2-, 3- und mehrbasische Säuren (gesättigte, ungesättigte, aromatische); mehrbasische Oxy-, Keton- usw. Säuren sind bei den jeweiligen Substituenten besprochen.

Wir betrachten zweckmäßig zuerst die Glieder der gesättigten ω-ω-Reihe, d. h.

---

[1]) Die niederen Glieder auch durch Wasserstoff aus Zn + H_2SO_4.

[2]) Deutung dieser Verhältnisse durch Thieles Annahme über konjugierte Doppelbindungen (Ann. **306**, 87ff.), die auch die Entstehung von β-substituierten Derivaten bei Addition von HX an $\Delta\alpha\beta$-Säuren erklären (während doch sonst COOH auf Halogen eine anziehende Wirkung ausübt). Der Verlauf wird dort gedacht vor sich gehend entsprechend den Formeln

$$RC{=}C{-}C\begin{matrix}\diagup\!\!\!{=} O\\ \diagdown OH\end{matrix} + HX \longrightarrow$$

$$\underset{\text{Addition in 1,4-Stellung}}{RCX{-}C{=}C\begin{matrix}\diagup OH\\ \diagdown OH\end{matrix}} \longrightarrow \underset{\text{Umlagerung nach Erlenmeyers Regel}}{RCX{-}CH{-}C\begin{matrix}\diagup\!\!\!{=} O\\ \diagdown OH\end{matrix}}$$

Bei der Addition von Halogen dagegen reagiert C=C—C=O nicht wie ein konjugiertes System (wegen der mangelnden Neigung zur Addition zwischen Sauerstoff und Halogen), sondern C=C reagiert für sich. $RCH{=}CH{-}CH_2{-}COOH$ addiert momentan Brom, $RCH{=}CH{-}COOH$ viel langsamer.

die, bei denen die Carboxyle an den End-C-Atomen der längsten Kette des Moleküls stehen, und zwar ausgehend von denen mit normaler gerader Kette, als deren Substitutionsprodukte sich alle anderen auffassen lassen:

Oxalsäure COOH—COOH.

Malonsäure COOH—CH_2—COOH und Homologe COOHCHRCOOH und

$$\mathrm{COOH{-}\overset{R}{\underset{R}{C}}{-}COOH}$$ (z. B. i-Bernsteinsäure oder Aethylidenbernsteinsäure

$$\mathrm{COOH{-}\underset{CH_3}{CH}{-}COOH}).$$

Bernsteinsäure COOH—CH_2—CH_2—COOH und deren durch stufenweisen Ersatz der vier Methylenwasserstoffe mögliche Homologe.

Glutarsäure $COOH(CH_2)_3COOH$ und Homologe.

Adipinsäure $COOH(CH_2)_4COOH$ und Homologe.

Pimelinsäure $COOH(CH_2)_5COOH$ und Homologe.

Korksäure $COOH(CH_2)_6COOH$ und Homologe usw.

In der Nomenklatur werden gewöhnlich, anders als in dieser Anordnung die Säuren mit gleicher C-Atomzahl zusammengefaßt (vgl. oben den Namen i-Bernsteinsäure).

Man kann auffassen die Malonsäurereihe als in α-Stellung carboxylierte Essigsäuren, die Bernsteinsäurereihe als in β-Stellung carboxylierte Propionsäuren usw. Ein jedes der Homologen ist aus dem zugehörigen Grundtyp ableitbar durch Ersatz von Wasserstoff mit Kohlenwasserstoffresten. Die Zahl der Isomeren steigt daher mit der Zahl der C-Atome sehr schnell. Die bekannten und wichtigen, auch von der Natur begünstigten Formen haben indessen normale Struktur. Wir betrachten daher vor allem Bildung und Verhalten dieser.

Oxalsäure. Oxalsäure entsteht aus Dicyan und anderen Persubstitutionsprodukten des Aethans, z. B. C_2Cl_6, mit verseifenden Mitteln. In Umkehrung dieser Reaktion gibt oxalsaures Ammon bei Entziehung von Wasser wieder Cyan.[1])

$$N{\equiv}C{-}C{\equiv}N + 4H_2O \rightleftarrows COONH_4{-}COONH_4.$$

Technische Darstellung durch Aetzkalischmelze von Sägespänen, d. h. Zellulose (dabei intermediär Bildung von Formiat); früher durch Oxydation von Zucker mit HNO_3 („Zuckersäure"). Oxalat entsteht auch aus Na-Metall + CO_2[2]) und beim Erhitzen von Formiat im Vakuum unter Entbindung von Wasserstoff: $2HCOONa \rightarrow (COONa)_2 + H_2$.

Malonsäure. Malonsäure erhält man aus Essigsäure durch Ueberführung in Chlor- und Cyanessigsäure und Verseifung. Darstellung ihrer Homologen entsprechend aus anderen α-halogenierten Säuren

$$RCHBrCOOH \longrightarrow RCH\left\langle\begin{matrix}CN\\COOH\end{matrix}\right. \longrightarrow RCH\left\langle\begin{matrix}COOH\\COOH.\end{matrix}\right.$$

Die Nachbarschaft zweier Carboxyle bewirkt, daß in der Methylengruppe des Malonesters Wasserstoff durch Natrium ersetzbar ist (vgl. S. 786). Substanzen mit reaktivem Halogen, z. B. J, bilden mit der entstehenden Natriumverbindung NaJ und substituierte Malonsäuren, z. B. gelangt man mit halogensubstituierten Säuren zu dreibasischen Säuren, die beim Erhitzen unter CO_2-Abspaltung in zweibasische übergehen, da bekanntermaßen Verbindungen mit mehreren Carboxylen an einem C-Atom zur CO_2-Abgabe neigen. Ebenso können durch Säurechloride Säureradikale, z. B. Acetyl, Benzoyl, eingeführt werden.

$$\begin{matrix}\text{Na-Malonester} +\\ \text{Cl-Essigester}\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}COOR\\ CH{-}CH_2COOR\\ COOR\end{matrix} \quad \begin{matrix}\text{1 Mol.}\\ \text{Na-} + \text{1 Mol.}\\ \text{Cl-Derivat}\\ \text{des letzteren}\end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix}CH_2COOR\\ |\\ C(COOR)_2\\ |\\ C(COOR)_2\\ |\\ CH_2COOR\end{matrix}$$

[1]) Man vgl. die analoge Beziehung zwischen Blausäure und Ameisensäure

$$HCOONH_4 \rightleftarrows HCN + 2H_2O.$$

[2]) Analog Formiat aus CO + Natronkalk oder CO_2 + KH. Wegen ihrer Einfachheit wichtige C-Synthesen, auf Grund deren sich alle höheren Derivate ähnlich wie aus Methan auch von CO und CO_2 ableiten lassen.

Ganz ähnlich ist der Verlauf bei Verwendung von Acetessigester zur Gewinnung höherer zweibasischer Säuren. In $CH_3COCHNaCOOR$ ersetzt man Na durch einen Säurerest und gewinnt durch Abspaltung von CH_3CO (als Essigsäure) daraus die zweibasische Säure. Wenn die verwendeten halogenierten Säuren wie gewöhnlich α-substituiert sind, so gelangt man zu alkylsubstituierten Bernsteinsäuren.

$$\begin{matrix} CH_3 \\ CO \\ CHNa \\ COOR \end{matrix} + ClCHR{-}COOH \longrightarrow \begin{matrix} CH_3COOH \\ + \\ CH_2{-}CHR{-}COOH \\ COOR, \end{matrix}$$

Glutarsäure. Glutarsäure entsteht aus Trimethylenbromid $CH_2Br{-}CH_2{-}CH_2Br$ mit KCN und Verseifung. Höhere zweibasische Säuren erhält man aus jodsubstituierten Säuren, von denen 2 Moleküle durch molekulares Silber entjodet und zusammengeschweißt werden, z. B.

2 Mol. β-Jodproprionsäure + Ag $\longrightarrow$ Adipinsäure

oder umgekehrt durch Einwirkung von Jod auf 2 Moleküle der Na-Verbindung einer Säure mit aktiver Methylengruppe (z. B. Malonester) oder schließlich durch Wechselwirkung einer derartigen Na-Verbindung mit halogensubstituierter Säure. Ester höherer Dicarbonsäuren bilden sich auch durch Elektrolyse der Estersalze niederer Säuren

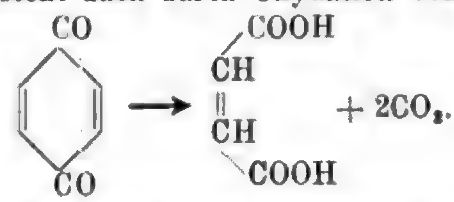
$$2COOR{-}CH_2{-}COOK \longrightarrow COORCH_2CH_2COOR + 2CO_2 + K_2.$$

Die Dicarbonsäuren stellen eines der Zwischenprodukte der stufenweisen Oxydation vieler C-Verbindungen dar (Fette, Kohlehydrate). Dies ist wohl der Grund ihres relativ häufigen Vorkommens in der Natur (Ablagerungen von oxalsaurem Kalk in den Zellen der Pflanzen als Stoffwechselprodukt oder Exkret).

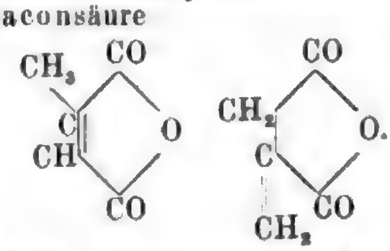
Von ungesättigten zweibasischen Säuren sind die niedersten möglichen solche mit 4 C-Atomen: **Fumar-** und **Maleinsäure** $COOHCH{=}CH{-}COOH$, deren Isomerie sich stereochemisch erklärt. Wegen der Fähigkeit zur Anhydridbildung erteilt man der Maleinsäure die cis-Formel $\begin{matrix} CHCOOH \\ \| \\ CHCOOH \end{matrix}$. Sie sind aus den substituierten gesättigten Disäuren darstellbar nach den für Herstellung der Doppelbindung allgemein gültigen Methoden, z. B. Fumar- und Maleinsäure aus Aepfelsäure $COOHCHOHCH_2COOH$, Glutaconsäure aus Acetondicarbonsäure

$$COOH{-}CH_2{-}CO{-}CH_2{-}COOH \longrightarrow COOH{-}CH{=}CH{-}CH_2{-}COOH.$$

Es können aber auch andere Methoden Verwendung finden, wie die Einführung ungesättigter Kohlenwasserstoffradikale in Malonester (wobei man olefinsubstituierte Malonsäuren erhält), oder Einwirkung von Aldehyd auf Malonester, wobei Säuren vom Typus $RCH{=}C(COOR)_2$ entstehen, die natürlich unter CO_2-Verlust leicht in einbasische Säuren übergehen. Maleinsäure entsteht auch durch Oxydation von Chinon



Von der natürlich vorkommenden **Zitronensäure** $\left(= \text{Oxytricarballylsäure } \begin{matrix} CH_2COOH \\ COHCOOH \\ CH_2COOH \end{matrix}\right)$ aus kann man durch Wasserentziehung gelangen zur Aconitsäure $\begin{matrix} CH_2COOH \\ | \\ C{-}COOH \\ \| \\ CHCOOH \end{matrix}$ und weiter zu den Anhydriden der **Citracon-** und **Itaconsäure**



Auch die **Dicarbonsäuren des Acetylens**, des Di- und Tetra-Acetylens

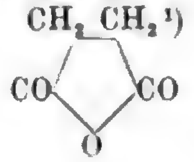
$$COOH{-}C{\equiv}C{-}C{\equiv}C{-}C{\equiv}C{-}C{\equiv}C{-}COOH$$

sind dargestellt worden, erstere aus Dibrombernsteinsäure mit alkoholischem Kali.

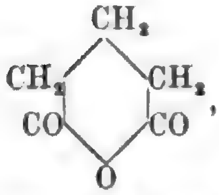
Wichtig ist vor allem das verschiedene Verhalten zweibasischer Säuren beim Erhitzen. Oxalsäure sublimiert bei vorsichtigem Erhitzen, andernfalls geht sie über in $CO + CO_2 + H_2O$. Sie erscheint damit als gemischtes Hydrat von $CO + CO_2$, ebenso wie HCOOH als Hydrat von CO, Malonsäure als das des Kohlensuboxydes C_3O_2 betrachtet werden kann, das aus ihr mit P_2O_5 entsteht $\left(C\begin{matrix} CO \\ CO \end{matrix}\right)$.

Beim Erhitzen spalten Malonsäure und

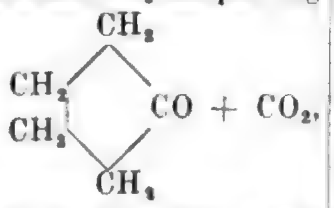
Homologe CO_2 ab. Bernstein- und Glutarsäure und ihre Homologen geben ringförmige Anhydride



und



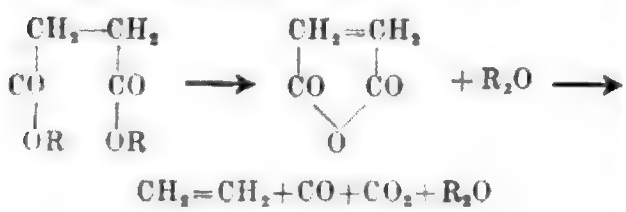
, die durch Wasser nur langsam wieder zu den Hydraten hydrolysiert werden. Die höheren Säuren sind unzersetzt, eventuell im Vakuum, destillierbar, bei Ueberhitzung ist der Verlauf der Zersetzung nicht eindeutig. Bei den Säuren C_6 bis C_{10} bildet sich neben der, wie bei Malonsäure erfolgenden, einfachen CO_2-Abspaltung ein Ringketon, z. B.



schließlich entsteht unter Abspaltung von H_2O und CO auch ungesättigte Säure als Nebenprodukt. Je höher man in der Reihe aufsteigt, um so mehr tritt gleichzeitige Teerbildung und weitergehende Zersetzung ein.

Die mehrbasischen Säuren sind alle fest, die niederen in Aether unlöslich, in Wasser löslich — und zwar die mit gerader C-Anzahl leichter als die ungeraden —, bei den höheren ist die Löslichkeit umgekehrt. Mit Wasserdampf sind auch die niederen Glieder nicht flüchtig. — Sie zeigen die Zickzackform der Schmelzpunktkurven genau wie die einbasischen Säuren (vgl. S. 788). Die Säurestärke nimmt bei den ersten Gliedern rapid ab (Oxalsäure: Malonsäure: Bernsteinsäure = 10:0,4:0,0024), weiterhin sehr allmählich. Die Stärke der Acetylendicarbonsäure erreicht die der Schwefelsäure. Die zweibasischen Säuren geben alle Reaktionen der Monocarbonsäuren zweimal; ihre Salze mit Natronkalk erhitzt gehen in die um 2 C-Atome ärmeren Kohlenwasserstoffe über.

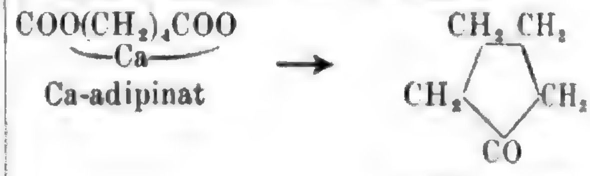
[1]) Aus Di-Estern der Bernsteinsäure entsteht unter dem Einfluß von Katalysatoren auf dem Wege über dieses Anhydrid (unter Abspaltung von Aether) Aethylen, CO und CO_2



Unter Umständen verlaufen ihre Reaktionen intramolekular unter Ringschluß. Z. B. gelangt man

1. zu heterozyklischen Ringen (Anhydride und Amide; vgl. oben),

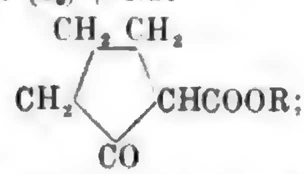
2. zu isozyklischen Ringketonen durch trockenes Erhitzen der Ca-Salze:



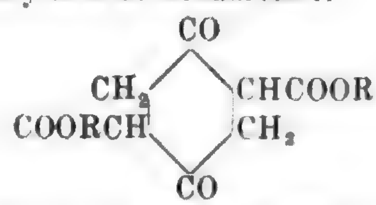
Cyklopentanon, Adipinketon.

In derselben Weise entsteht aus korksaurem Calcium das Suberon, ein 7-Ring;

3. durch intramolekulare Kondensation nach Art der Claisen-Synthese (vgl. S. 786, 808) zu Estern von Ringketonen; z. B. Adipinester (C_6) + Na:



4. zu Benzolderivaten, z. B. aus 3 Mol. Na-Malonester zum Phloroglucintricarbonsäureester, aus 2 Mol. Bernsteinsäureester zum Succinylobernsteinsäureester oder p-Diketohexamethylendicarbonsäureester



4. Halogensubstituierte Säuren.

Cl-, Br-, J-, Fl-, CN-Säuren.

α-, *β*-, *γ*-usw. halogenierte Säuren.

Ein- und mehrfach halogenierte Säuren.

Gesättigte und ungesättigte Säuren (Halogen und Doppelbindung getrennt oder vereinigt).

Säuren mit Halogen in primärer, sekundärer, tertiärer Bindung.

Kernhalogenierte Benzoesäuren.

Zur Einführung von Halogen in Säuren verfügbare Methoden sind folgende:

1. Einwirkung freien Halogens auf die Säure; oder

2. starker Halogenwasserstoffsäure[1]) oder der Haloide des Phosphors auf Oxysäuren. Letztere Methode ist auch anwendbar auf Keton- und Aldehydsäuren.

3. Addition von Halogenwasserstoff oder von freiem Halogen an Ensäuren.

Die direkte Einwirkung freien Halogens auf die freie Säure erfolgt, namentlich zu

[1]) Auch aus Aminosäuren mit $NaNO_2$ in stark salzsaurer Lösung.

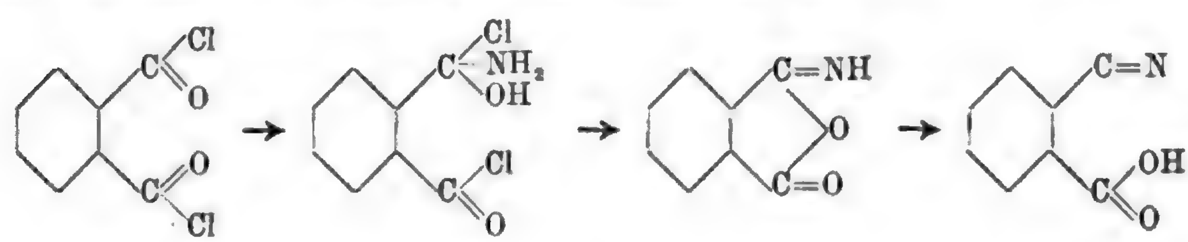
Anfang der Reaktion, nicht leicht und erfordert besonders günstige Bedingungen (Licht, Temperatur, Katalysatoren). Je höher molekular die Säure, um so leichter die Einwirkung des Halogens. Säuren mit tertiärem C-Atom sind leichter chlorierbar als andere. Viel glatter verläuft die Halogenisierung der Anhydride, Chloride und Bromide der Säuren am Stamm. Acetanhydrid wird schon bei gewöhnlicher Temperatur schnell von Brom angegriffen, ist bei 100° nach kurzer Zeit quantitativ bromiert. Methode von Hell-Volhard-Zelinsky: Behandlung der Säuren mit Brom und Phosphor; Zerlegung mit Wasser erzeugt aus den bromierten Säurebromiden die freie bromierte Säure. Ersetzt wird dabei nur α-Wasserstoff und dieser nur in Einzahl. Die Reaktion schreitet nur ganz untergeordnet weiter fort. Nur bei sehr energischer Einwirkung können ausnahmsweise beide α-Wasserstoffe bromiert werden. Ist kein α-ständiger Wasserstoff vorhanden (tertiäre Säuren), so bleibt die Einwirkung ganz aus [1]), Dicarbonsäuren nehmen andererseits in der Regel 2 Br-Atome auf. — Ueber eine ganze Reihe von Zwischenprodukten kann man zum Chloressigester auch von dem wohlfeilen Acetylen aus gelangen:

$$CH \equiv CH \longrightarrow CHCl_2-CHCl_2 \longrightarrow CHCl=CCl_2 \xrightarrow{+NaOC_2H_5} CHCl=CClOC_2H_5 \longrightarrow CH_2Cl-COOC_2H_5$$

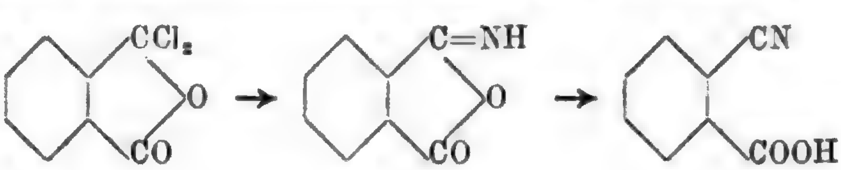
β-Halogensäuren werden hauptsächlich erhalten durch Addition von Halogenwasserstoff an $\alpha\beta$-ungesättigte Säuren, vielfach auch durch Chlorierung mit einer Lösung von Chlor in CCl_4 im Sonnenlicht; γ-Halogensäuren durch Einwirkung von Halogenwasserstoff auf γ-Oxysäuren oder deren Laktone, wobei Ringsprengung durch Addition eintritt, auch durch Addition von Halogenwasserstoff an $\beta\gamma$-Ensäuren (Umwandlung verschieden substituierter Halogensäuren gemäß dem Schema $RCH_2 - CHBr - COOH \rightarrow RCH = CH - COOH \rightarrow RCHBr - CH_2 - COOH$); Polyhalogensäuren mit verteiltem Halogen durch Addition von Halogen an einfach oder mehrfach ungesättigte Säuren, solche mit gehäuftem Halogen aus Aldehyd bezw. Ketonsäuren mit PCl_5.

Jodsäuren entstehen aus den Chlor- oder Bromverbindungen durch Jodide von K, Ca, Mg — sie sind wesentlich weniger beständig als die Cl- und Br-Verbindungen —; Fluorsäuren aus den Jodverbindungen mit HgF_2 oder AgF.

Cyansäuren sind aus den Estern der Halogensäuren mit Metallcyaniden (K, Ag) erhältlich. Ihre Entstehung durch HCN-Addition an manche ungesättigte Säuren wurde bereits auf S. 797 erwähnt. Cyanbenzoesäure gewinnt man aus Diazobenzoesäure mit K-Cu-Cyanür; auch aus Phtalylchlorid mit NH_3:



oder unter Annahme eines unsymmetrischen Baues des Phtalylchlorids



Cyanpropionsäure entsteht aus Wolle bei Oxydation mit alkalischer $KMnO_4$-Lösung. Beim Erhitzen geht sie über in CO_2 + Acetonitril CH_3CN.

Die Cyansäuren sind wenig beständig. Mit Wasser gehen sie leicht über in Disäuren, als deren Halbnitrile sie aufgefaßt werden können. Bei Reduktion liefern sie Aminosäuren. Cyanessigsäure, die bei der Malonsäuresynthese als Zwischenprodukt entsteht, ähnelt jener Säure, indem sie ebenfalls reaktive Methylenwasserstoffe besitzt.

Halogensäuren kommen in der Natur nicht vor. Um so größer ist ihre allgemein synthetische Bedeutung. Die Monochloressigsäure wird technisch im großen Maß-

[1]) Aus der Bromierbarkeit kann daher auf Vorhandensein von α-Wasserstoff in einer Säure geschlossen werden.

stabe gewonnen zur Darstellung künstlichen Indigos (über die Phenylglycin-o-carbonsäure ). Das Halogen der Halogensäuren ist unbekümmert um die Gegenwart der COOH-Gruppe aller Umsetzungen der halogenierten Kohlenwasserstoffe fähig; viele davon sind erleichtert, z. B. die Substituierbarkeit durch Wasserstoff, die sogar den kerngechlorten Säuren zukommt (Halogenbenzoesäuren + Na-Amalgam), während sonst ein an =C haftendes Halogen in Kohlenwasserstoffen, ebenso wie in Säuren geringe Reaktivität zeigt. Gegen OH z. B. tauschen Halogenbenzoesäuren ihr Halogen erst bei der Kalischmelze aus. Halogen-Ensäuren geben bei Reduktion Halogen-Ansäuren, ohne daß eine Resubstitution durch Wasserstoff stattfindet. — Benachbarte Dihalogensäuren gehen bei Reduktion in Ensäuren über, eine Substitution durch Wasserstoff findet in der Regel nicht oder erst sekundär statt. — Die verschiedenen Klassen halogenierter Säuren zeigen sehr charakteristische Unterschiede in den Reaktionen, z. B. bei Behandlung mit verseifenden Mitteln: Die α-mono-Verbindungen werden schon durch längeres Kochen mit viel Wasser verseift. Mit tertiären Basen (Chinolin, Dialkylanilin) spalten sie glatt HBr ab und gehen in $\alpha\beta$-Ensäuren über. Mit alkoholischem Kali findet daneben Ersatz des Halogens durch OH oder OCH_3 statt. — α-Br-Säurebromide geben beim Behandeln mit Zn **Ketene**, eine neuerdings erst entdeckte Körperklasse von erheblicher theoretischer und synthetischer Bedeutung

$$RCHBr—COBr \longrightarrow RCH=C=O$$

α-di-Halogensäuren: überführbar in Ketonsäuren, jedoch von kochendem Wasser wenig, auch von Kali ziemlich schwer angegriffen. Nur bei $CHCl_2COOH$ leichter Uebergang in Glyoxylsäure; während Trichloressigsäure durch Kali in Chloroform und CO_2 gespalten wird.

Die β-mono-Verbindungen gehen leicht in ungesättigte Säuren über. Besonders merkwürdig verläuft die Reaktion beim Kochen mit Soda — zuweilen schon in der Kälte beim Neutralisieren —: unter Bildung von Halogenalkali und Abspaltung von CO_2 entstehen ungesättigte Kohlenwasserstoffe, bei β-Dihalogensäuren ungesättigte monohalogenierte Kohlenwasserstoffe, bei halogensubstituierten zweibasischen Säuren ungesättigte einbasische Säuren (vgl. S. 794). — Die β-di-Verbindungen sind leicht überführbar in ungesättigte Säuren vom Typus RCCl=CH—COOH

Ueber den leichten Uebergang der γ-Halogensäuren in Laktone vgl. S. 787.

Salze der Halogensäuren sind trocken durch Abdampfen nur im Vakuum erhältlich, weil sie unter Entstehen von Oxysäuren sehr zur Bildung von Chlormetall neigen.

Ester chlorierter Säuren geben mit Ammoniak in der Kälte Amide chlorierter Säuren, in der Hitze Aminosäureamide. Auch Anilin kann in doppelter Weise einwirken:

$$CH_2Cl—COOH + C_6H_5NH_2 \begin{cases} \nearrow CH_2Cl—CONHC_6H_5 + H_2O \\ \searrow CH_2(NHC_6H_5)COOH + HCl. \end{cases}$$

Von den Chloressigsäuren ist das Di-Derivat flüssig, die beiden anderen fest. Alle drei zeigen Aetzwirkung auf die menschliche Haut. Noch stärker die Jodessigsäure. Monochloressigsäure zieht auf der Haut Blasen, ihr Dampf reizt stark zu Tränen. Trichloressigsäure ist ein starkes Aetzmittel, wird gegen Hühneraugen verwandt. Sie ist wichtig wegen ihrer Beziehungen zu Chloral und Chloroform.

Einige höhere Halogensäuren oder Derivate derselben sind als Ersatzmittel von Brom- und Jodalkalien in der Therapie vorgeschlagen worden, z. B. Monojodbehensäure als Ca-Salz unter dem Namen Sajodin; in Wasser unlösliches Pulver. Die Säure $C_{21}H_{42}JCOOH$ enthält Halogen und COOH im Abstand von mindestens 12 C-Atomen.

5. Sauerstoffsubstituierte Säuren. 5a) **OH-substituierte Säuren** [Oxysäuren (Alkohol- und Phenolsäuren), Olsäuren] **und Aethersäuren.** Sie können entstanden gedacht werden dadurch, daß in einem Kohlenwasserstoff ein Wasserstoff durch Hydroxyl, ein anderer durch Carboxyl ersetzt ist. Wir befolgen die Anordnung des Stoffes nach der Stellung der Substituenten zueinander: α-, β-, γ-Oxysäuren. Weiterhin hat man: Mono-, Di-, Polyoxysäuren, wobei nur solche mit verteilten OH-Gruppen in Frage kommen, während an Stelle derer mit gehäuften OH an einem C-Atom wieder (vgl. den Artikel

„Alkohole") Aldehyd-, Keton- und Di-Säuren auftreten; ungesättigte Oxysäuren, die die Gruppe =COH enthalten — sie sind entsprechend der Erlenmeyerschen Regel (vgl. S. 784) nur ausnahmsweise beständig und stehen im Verhältnis der Tautomerie zu den entsprechenden gesättigten CO-Verbindungen:

$$\underset{\text{Formylessigsäure}}{HCO{-}CH_2{-}COOH} \rightleftarrows \underset{\text{Oxymethylenessigsäure}}{HCOH{=}CH{-}COOH}$$

Die Dioxysäuren werden auch wohl als dreiwertige (nach der Gesamtzahl reaktiver Wasserstoffe) einbasische Säuren bezeichnet; ebenfalls „dreiwertig" sind die Oxydisäuren oder zweibasischen Oxysäuren. — Schließlich kann man die Oxysäuren natürlich auch klassifizieren, den Alkoholen entsprechend, in solche mit primärer, sekundärer, tertiärer Alkoholgruppe (wobei die mit primärer Alkoholgruppe zu der großen wichtigen Klasse der ω,ω-Disubstitutionsprodukte der Kohlenwasserstoffe gehören, die auch die Dialdehyde, Dinitrile, Disäuren, Aldehydsäuren usw. umfaßt; zu denen mit tertiärer Oxygruppe gehören die Phenolsäuren). — Noch mehr Möglichkeiten Raum gibt die Einteilung mehrfach substituierter Säuren, z. B. in oxy-di-Säuren, poly-oxy-Säuren, oxy-en-di-Säuren, poly-keton-Säuren usw.

Entstehung. Oxysäuren entstehen durch Einführung von OH in Säuren, von COOH in Alkohole, auch durch Umbildung bereits disubstituierter Produkte, durch Kondensation z. B. einer OH-haltigen mit einer COOH-haltigen Verbindung usw. Außer den additiv sich ergebenden Reaktionen der OH- und der COOH-Gruppe sind hier von besonderer Wichtigkeit die durch den Einfluß der Stellung gegeneinander bedingten, da OH und COOH als Gruppen entgegengesetzten chemischen Charakters zu Reaktionen miteinander sehr neigen und mannigfache H_2O-Abspaltungsprodukte je nach der gegenseitigen Stellung bilden. — Die Zahl der Isomeren durch räumlich verschiedene Anordnung ist bei den Oxysäuren (Milchsäure, Weinsäure) besonders eingehend studiert worden.

α-Oxysäuren und zwar mit sekundär gebundenem OH bilden sich bei Addition von HCN an Aldehyde und Verseifung.

$$RC^{H}_{O} + HCN \longrightarrow RC^{H}_{OH}{-}CN \longrightarrow RC^{H}_{OH}{-}COOH.$$

tertiäre α-oxy-Säuren analog aus Keton + HCN: $\begin{matrix}R\\R\end{matrix}\!>\!COH{-}CN$; außerdem durch direkte Oxydation tertiärer Säuren:

$$\begin{matrix}R\\R\end{matrix}\!>\!CH{-}COOH \longrightarrow \begin{matrix}R\\R\end{matrix}\!>\!COH{-}COOH.$$

Auch aus Jodalkyl + Zink (d. h. Zinkalkyl) + Oxalester, dabei wird ein Sauerstoff der CO-Gruppe durch R_2 ersetzt

$$\begin{matrix}COOR\\|\\COOR\end{matrix} \xrightarrow{+ZnR_2} \begin{matrix}RR\\\diagdown\!\diagup\\COR\\|\\COOR\end{matrix} (+ZnO) \xrightarrow{+H_2O} \begin{matrix}RR\\\diagdown\!\diagup\\COH\\|\\COOH\end{matrix}$$

Weiter nach der S. 798 angegebenen Malonsäure-Synthese, indem die alkylierte Malonsäure chloriert und verseift wird. — Endlich aus den α-Amidosäuren (Spaltprodukte des Eiweißes) mit HNO_2.

β-Oxysäuren. 1. Aus den 1,2-Halogenhydrinen mit KCN und Verseifung, z. B.

$$CH_2=CH_2 \xrightarrow[+HOCl]{} CH_2OH{-}CH_2Cl \longrightarrow CH_2OH{-}CH_2{-}CN \text{ usw.}$$

2. Durch Reduktion der β-Ketonsäuren z. B. der dialkylierten Acetessigester:

$$CH_3COCR_2COOR \longrightarrow CH_3CHOHCR_2{-}COOR.$$

3. Aus $\alpha\beta$-Ensäuren durch Halogenwasserstoffaddition und Kochen mit Wasser, oder direkte Anlagerung von Wasser an die Ensäure durch Kochen mit NaOH, wobei man in diesem Falle übrigens auch von $\Delta\beta\gamma$-Säuren ausgehen kann:

$$\left.\begin{matrix}RCH_2{-}CH{=}CH{-}COOH\\RCH{=}CH{-}CH_2{-}COOH\end{matrix}\right\rangle RCH_2{-}CHOH{-}CH_2{-}COOH.$$

4. Auch durch oxydative Spaltung von sekundären oder tertiären $\Delta\beta\gamma$-Alkoholen

$$\begin{matrix}R\\R\end{matrix}\!\!>COH-CH_2-CH=CH_2 \longrightarrow$$

$$\ldots\ldots\ CHOH-CH_2OH$$
$$\ldots\ldots\ COOH + CO_2 + H_2O.$$

5. Aus Aldehyden oder Ketonen mit α-Br-Säureestern und Zink

$$RC^{H}_{O} + \underset{R}{\underset{\cdot}{C}}HBr-COOR$$

$$\longrightarrow RC^{H}_{OH}-\underset{R}{\underset{\cdot}{C}}H-COOR.$$

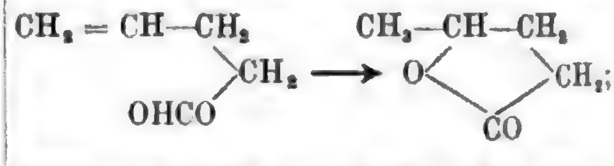
Vgl. die ähnliche Perkinsche Reaktion (S. 786), bei der die intermediär gebildeten Oxysäuren aber in der Regel nicht erhalten werden.

6. β-Oxypropionsäure entsteht durch Kochen mit Wasser oder Ag_2O aus β-Jodpropionsäure, welch letztere aus Glycerinsäure mit $J + P$ entsteht; oder ebenfalls vom Glycerin aus über Acrylsäure $CH_2=CHCOOH$ durch H_2O-Addition (Hydrakrylsäure).

7. β-Oxybuttersäure entsteht durch Oxydation des Aldols $CH_3-CH=CH-C^{H}_{O}$, welches durch Kondensation zweier Moleküle Acetaldehyd erhalten wird.

β-Oxy-ensäuren sind die Enolformen der β-Ketonsäuren (siehe bei diesen und in den Artikeln „Acetessigester" und „Tautomerie").

γ-Oxysäuren. Man erhält sie aus an der γ-Stelle ketonisierten und halogenisierten Verbindungen (welch letztere aus $\beta\gamma$-Ensäuren mit Halogenwasserstoff entstehen); aus $\beta\gamma$-, aber auch aus $\gamma\delta$-Ensäuren mit verd. H_2SO_4, wobei direkt die Laktone sich bilden, z. B. Allylessigsäure → Valerolakton:



(auch sonst erhält man vielfach die Laktone an Stelle der freien Säure). Weiter erhält man sie aus in 1,3-Stellung durch OH und Halogen gleichzeitig substituierten Verbindungen durch Ueberführung in Oxycyanid und Oxysäure:

$$CH_2OH-CH_2-CH_2Cl \longrightarrow CH_2OH-CH_2-CH_2-CN \longrightarrow CH_2OH-CH_2-CH_2-COOH$$

und aus α-Halogenhydrinen mit Na-Acetessigester oder -Malonester:

$$\begin{matrix}COOR\\CHNa\\COOR\end{matrix} + Cl-CH_2-CHOH-R \longrightarrow \begin{matrix}HO\ COOR\\H\ CH-CH_2-CHOH-R.\\COOR\end{matrix}$$

Durch Reduktion in saurem Medium gehen die Laktone in An-Säuren über.

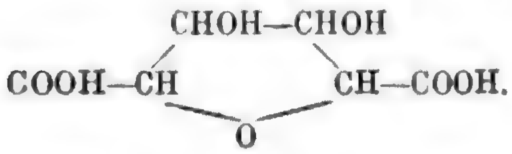
In die Klasse der γ-oxy-Ensäuren gehören die Angelikalaktone (aus Lävulinsäure).

Als Repräsentant der Oxy-Ensäuren, die OH und Doppelbindung getrennt enthalten, und darum die Reaktionen beider additiv zeigen, sei noch die Ricinusölsäure erwähnt. Man formuliert sie $C_{17}H_{32}OH.COOH$ oder $CH_3(CH_2)_5CHOH.CH=CH(CH_2)_8COOH$, d. i. als Oxyölsäure, weil sie beim Destillieren $C_{10}H_{19}COOH$ und $C_7H_{13}OH$ (Oenanthol) als Zersetzungsprodukt liefert.

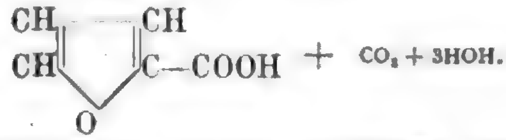
Zwischen Oxysäuren und Kohlehydraten (und den den Kohlehydraten nahestehenden „Ringzuckern", wie Inosit) sind nahe Beziehungen vorhanden, wie auch das Vorkommen einer Anzahl derselben in vielen Pflanzen dartut (Glykolsäure, Weinsäure, Zitronensäure, Aepfelsäure u. a.). Durch den Einfluß der Milchsäurebakterien entsteht z. B. aus dem Milchzucker (auch aus Trauben- oder Rohrzucker) Milchsäure. Durch die allmählich zunehmende Säurekonzentration werden die Mikroorganismen getötet und die Reaktion wird zum Stillstand gebracht. Man neutralisiert daher bei künstlicher Leitung des Prozesses durch Zusatz von Kreide (dadurch wird zugleich verhindert, daß durch eine unerwünschte Nebengärung Buttersäure entsteht). Von Wichtigkeit sind die aus Hexosen durch Oxydation erhältlichen (a) Pentaoxycapron- und (b) Tetraoxyadipinsäuren (z. B. (a): Glukonsäure; (b): Zuckersäure, Schleimsäure):

$$CH_2OH.(CHOH)_4.COOH \quad (a)$$
$$COOH.(CHOH)_4.COOH \quad (b)$$

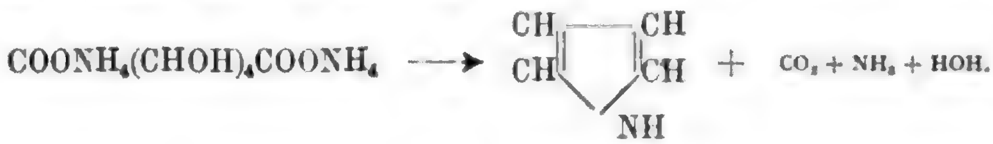
wichtig auch wegen ihrer nahen Beziehungen zu Fünfringen (Furan, Pyrrol). Anhydride derselben sind auffaßbar als Tetrahydrofuranderivate

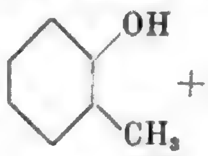
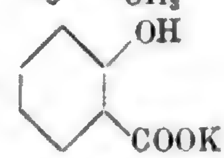


Schleimsäure erhitzt gibt α-Furancarbon-säure



Schleimsaures Ammon destilliert gibt Pyrrol:



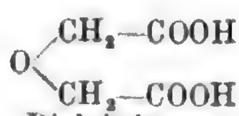
Phenolsäuren. Phenolsäuren (oxy-Benzoesäuren) werden gewonnen aus Phenolen, CO_2 und Alkali. Die wichtigste, ortho (= β-) oxy-Benzoësäure, oder Salicylsäure, entsteht durch Erhitzen von Phenolnatrium mit CO_2 unter Druck. Bei Anwendung der K-Verbindung und höherer Temperatur entsteht die para-oxy-Säure. Mehrwertige Phenole reagieren viel leichter, schon bei Erwärmen, mit wässerigen Carbonatlösungen. Man hat anzunehmen, daß sich zuerst Natrium-phenyl-carbonat $C\begin{matrix}{}^{\nearrow O}\\ -ONa\\ {}_{\searrow OC_6H_5}\end{matrix}$ bildet, dassichumlagert in $OH-C_6H_4COONa$, d. h. in Salicylat. Eine ähnliche Synthese liefert, von CCl_4 ausgehend, mit Na-phenolat und Alkali ein Gemenge von o- und p-Säure (vgl. weiteres in der Einleitung dieses Artikels). Phenolsäuren durch oxydierende alkalische Schmelze von Kresolen, z. B.  + O der Luft + KOH ⟶ 

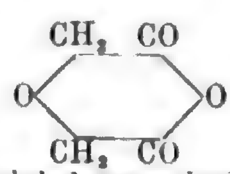
Die Oxybenzoesäuren sind einbasische Säuren nach der in der Einleitung gegebenen Definition; als organische Säuren im weiteren Sinne dagegen zweibasisch. Der Wasserstoff im Carboxyl hat stärker sauren Charakter als der der Phenolgruppe. Durch Alkalicarbonat wird nur der erstgenannte ersetzt, durch KOH beide.

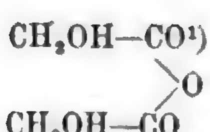
Die Säurestärke wird durch Einführung der OH-Gruppe abnehmend mit deren Entfernung vom Carboxyl erhöht (vgl. S. 785). Das Hydroxyl ist in den Oxysäuren aller Umwandlungen fähig, die es in den Alkoholen erleiden kann. Die Oxysäuren sind z. B. oxydierbar zu Keton-, Aldehydsäuren oder Disäuren. Sie können verestert werden (z. B. mit HCl zu Halogensäuren) und veräthert werden (vgl. unten z. B. sogenannte Diglykolsäure). Solche Reaktionen können auch innerhalb des Moleküls der Oxysäure selbst eintreten, die Oxysäuren sind daher meist, auch im Vakuum nicht unzersetzt destillierbar, weil sie H_2O-Abspaltungen in mehrfacher Richtung erleiden können.

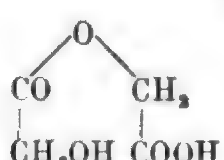
RCHORCOOH (sogenannte „Aethersäuren") und R.CHOH.COOR die Ester der Oxysäuren sieden dagegen fast unzersetzt, ebenso $\begin{matrix}R\\R\end{matrix}\!>COH-COOH$ (!) sowie die Laktone. Die verschiedenen Möglichkeiten der intra- und intermolekularen H_2O-Abspaltung zeigen am Beispiel der Glykolsäure folgende Formelbilder:

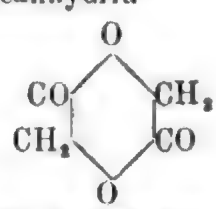
$CH_2OH-COOH$
Glykolsäure


Diglykolsäure


Diglykolsäureanhydrid


nicht bekannt


Glykolo-glykolsäure (analog den Dipeptiden, vgl. S. 782).

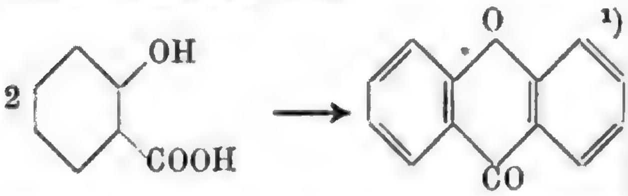

Glykolid (analog dem Laktid und Glykokollanhydrid, vgl. S. 787); polymerisierbar zu Polyglykolid.

---

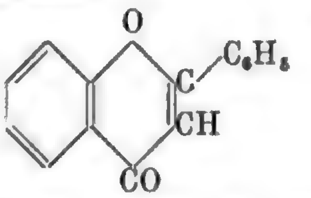
[1]) Das analoge Cl-Essigsäureanhydrid $(CH_2ClCO)_2O$ ist bekannt.

Salicylsäure bildet bei Entziehung von Wasser Salicylid $[COC_6H_4O—CO—C_6H_4—O]_2$ polymerisierbar zu Polysalicylid.

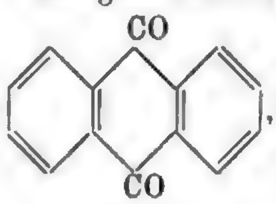
Von Bedeutung ist die Kondensierbarkeit von 2 Mol. Salicylsäure zu Xanthon (= Dibenzo-γ-Pyron), der Muttersubstanz vieler gelber Pflanzenfarbstoffe: [1])



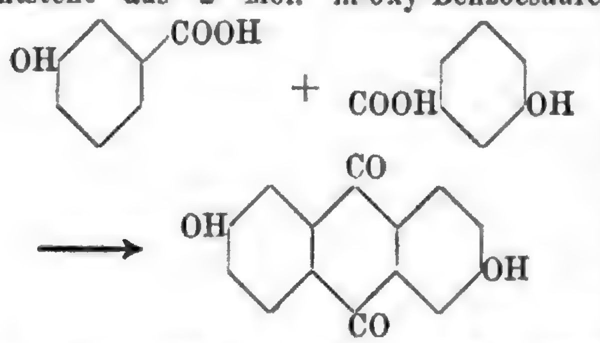
während man aus Salicylsäure und Acetophenon zum Flavon gelangt, von dem sich eine noch weit größere Menge gelber Pflanzenfarbstoffe ableiten: [2])



Das 3,7-Dioxyderivat des ganz ähnlich gebauten Anthrachinons



entsteht aus 2 Mol. m-oxy-Benzoesäure



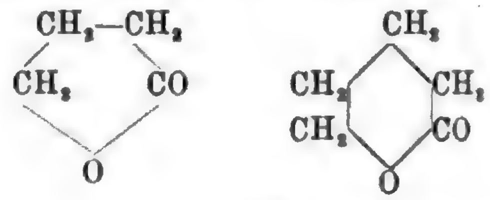
β-Oxysäuren sind anhydrisierbar unter Entstehen einer Doppelbindung:

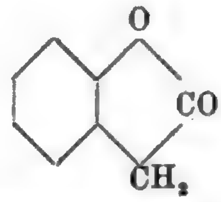
$CH_2OHCH_2COOH \longrightarrow CH_2{=}CHCOOH$
β-Milchsäure — Akrylsäure

Ausnahmsweise tritt derartige Anhydrisierung auch bei α-Oxysäure ein vom Typus

$\genfrac{}{}{0pt}{}{R}{CH_3}\!\!>COH—COOH \longrightarrow \genfrac{}{}{0pt}{}{R}{CH_2}\!\!>C—COOH$

δ- und γ-oxy-Säuren spalten intramolekular Wasser ab und bilden Laktone





Lakton der o-oxy-phenyl-Essigsäure.

Laktone sind beständig gegen Soda; addieren NaOH (Na-Salz der γ- oder δ-Oxysäuren), HBr (γ- oder δ-gebromte Säuren), NH_3 (γ- oder δ-Aminosäureamide). Letzte beide Reaktionen ganz nach Art einer ungesättigten Verbindung.

α-oxy-Säuren, und β-Säuren mit dialkylierter α-Stelle, z. B. $CH_3CHOH—CR_2COOH$ geben mit verd. H_2SO_4 oder auch für sich erhitzt Aldehyd oder Keton $CH_3CHOH—CR_2COOH \longrightarrow CH_3CHO + CHR_2COOH$; $RCH_2CHOHCOOH \longrightarrow RCH_2CHO + HCOOH$.

Oxysäuren finden sich sehr zahlreich in der Natur im Pflanzen- und auch im Tierkörper (Zitronensäure, Weinsäure, Milchsäure).

Die oxy-mono-Säuren sind meist nicht oder schlecht und langsam kristallisierende Sirupe, löslich in Wasser, schwer löslich in Alkohol und Aether. Sie sind nicht unzersetzt flüchtig, auch nicht mit Wasserdampf; auch die aromatischen Alkoholsäuren verhalten sich analog. Wesentlich davon verschieden sind die kernhydroxylierten Phenolsäuren (vgl. oben „cyklische Säuren"). Beispiele sind folgende (vgl. auch Abschnitt 12):

Glykolsäure $CH_2OHCOOH$; in unreifen Trauben.

Gewöhnliche Milchsäure = α-Oxypropionsäure; die razemische Form entsteht bei der sauren Gärung der Milch, des Sauerkrauts, der saueren Gurken usw.; die rechtsdrehende Form findet sich im Fleischsaft.

Glycerinsäure = Dioxypropionsäure $CH_2OH—CHOH—COOH$.

oxy-Malonsäure oder Tartronsäure.

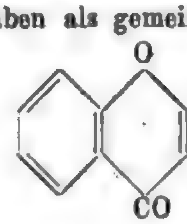
oxy-Bernsteinsäure = Aepfelsäure.

Dioxy-Bernsteinsäure = Weinsäure (optische Isomere; vgl. S. 822).

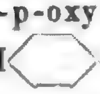
---

[1]) Indischgelb, alte geschätzte Malerfarbe, aus dem Harn künstlich krank gemachter Kühe bereitet, enthält das Magnesiumsalz der Euxanthinsäure, einer Verbindung von Dioxy-Xanthon oder Euxanthon mit Glukuronsäure $CHO(CHOH)_4COOH$.

[2]) Xanthon und Flavon haben als gemeinsame Muttersubstanz Chromon



Oxy-tricarb-allylsäure = **Zitronensäure**
$CH_2\,COOH$
$COHCOOH$
$CH_2\,COOH$

α-Amino-p-oxy-phenyl-propionsäure = **Tyrosin** OH—CH_2—$CH(NH_2)COOH$ (Spaltungsprodukt des Eiweißes).

Phenylglykolsäure = **Mandelsäure**.

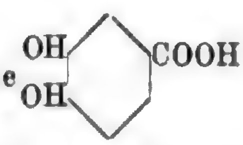
Diphenylglykolsäure = **Benzilsäure**.

Oxybenzoesäure = **Salicylsäure**.

[Salicylsäurephenylester = **Salol** (vgl. S. 791 Anm.); Acetylsalicylsäure = **Aspirin**; COOH—OCH_3 **Anissäure**].

Tri-oxy-benzoesäure = **Gallussäure**.

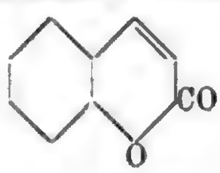
Gallussäureanhydrid = **Tannin** oder Gerbsäure.

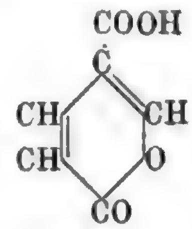
Protocatechusäure 

Vanillinsäure 

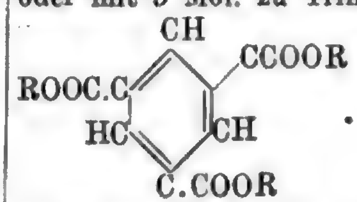
(ihr Aldehyd: **Vanillin**).

o-Oxy-Zimtsäure = **Cumarsäure**

(ihr Lakton  **Cumarin**).

5b) **Aldehyd- und Ketonsäuren.** Die Aldehydsäuren gehören zu der Klasse der ω,ω-Derivate. Von α-Aldehydsäuren existiert daher nur eine: Glyoxylsäure, die wichtigste der Klasse überhaupt. β-Aldehydsäuren $C{}^{H}_{O}$—CH_2—COOH **Formylessigsäure** und Homologe $C{}^{H}_{O}$—CHR—COOH sind die tautomeren Ketonformen der „Oxymethylenessigsäure". Sie zeigen keine eigentlichen Aldehydreaktionen; vgl. den Artikel „**Tautomerie**". Der Formylessigester selber ist kaum existenzfähig. Er kondensiert sich entweder mit 2 Mol. zu Cumalinsäure, einer α-Carbonsäure des α-Pyrons 

oder mit 3 Mol. zu Trimesinsäureester



. Die Homologen existieren als solche. Von höheren Aldehydsäuren möge erwähnt sein die der Formel $C{}^{H}_{O}(CHOH)_4COOH$ entsprechende Glukuronsäure, die eines der Oxydationsprodukte der Hexosen darstellt.

In gewissem Sinne kann die Aldehyd- und Säurereaktion zugleich gebende Ameisensäure zu den Aldehydsäuren gerechnet werden.

Glyoxylsäure. Glyoxylsäure entsteht durch Oxydation des Glykols, und somit auch des Alkohols; aus dihalogenierter Essigsäure durch Austausch des Halogens gegen OH; auch durch elektrolytische Reduktion von Oxalsäure, als Ester durch Reduktion von Oxalester mit NaHg. — Sirupartige, allmählich zu Prismen erstarrende Flüssigkeit, in H_2O löslich, mit H_2O-Dampf flüchtig; ist in unreifen Stachelbeeren vorhanden. Zeigt die Additionsreaktion der Aldehydgruppen, bildet z. B. ein Hydrat $\overset{H}{\underset{OH}{COH}}$—COOH, von dem sich die Salze ableiten. Beim Kochen mit Alkali Bildung von Oxalat + Glykolat (gleichzeitige Oxydation und Reduktion; vgl. $C_6H_5C{}^{H}_{O}$ + KOH. Synthetisch wichtig ist von den Derivaten der Diazoessigester $CH(N_2)COOR$.

Ketonsäuren. Von viel größerer Wichtigkeit sind die Ketonsäuren. Synthesen und Eigenschaften sind je nach α-, β-, γ-Stellung der Ketongruppe sehr verschieden. Die gegenseitige Beeinflussung ist am stärksten bei den β-substituierten, den synthetisch wichtigsten Gliedern der Klasse und der organischen Chemie überhaupt (Acetessigester). Zu betrachten sind die 3 Typen:

α-substituiert:	$CH_3COCOOH$	Brenztraubensäure	und Homologe.
β-substituiert:	CH_3COCH_2COOH	Acetessigsäure	
γ-substituiert:	$CH_3COCH_2CH_2COOH$	Lävulinsäure	

Höhere Säuren sind wenig bekannt, unwichtig.

Alle lassen sich auch auffassen als acylsubstituierte Monocarbonsäuren: β-Ketobuttersäure = Acetyl-Essigsäure = Butanon-3-säure.

Brenztraubensäure. Aus Weinsäure oder Glycerinsäure durch Erhitzen mit

$KHSO_4$ (auch, dem Namen entsprechend, beim Erhitzen von Weinsäure für sich unter CO_2-Abgabe; dabei oxydiert sich ein C auf Kosten des anderen: $2CHOH \longrightarrow CO$ u. CH_2). Mit Acetessigestersynthese: durch Spaltung von Oxalessigester $COOR—CO—CH_2COOR$ in Brenztraubensäure + CO_2.

α-Ketonsäuren: sie entstehen aus den Säurecyaniden oder aus den *α*-dihalogensubstituierten Säuren durch Verseifung und aus den *α*-Oxysäuren durch Oxydation.

β-Ketonsäuren: durch Einwirkung von Na auf 2 Mol. Essigester oder Propionsäureester entstehen

$$CH_3CO—CH_2COOR \quad \text{und} \quad CH_3CH_2CO—\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}HCOOR.$$

Die Reaktion ist nicht ausdehnbar auf die höheren Glieder wie Butter- und Valeriansäure, sondern verläuft hier in anderem Sinne (Ber. d. Deutschen Chem. Ges. **22**, Ref. 22). — Nach Claisen entsteht mit einer stets vorhandenen Spur Alkohol (ohne diese keine Reaktion) ein Additionsprodukt von Na-Alkylat und Essigester $CH_3\,C\begin{smallmatrix}OC_2H_5\\ONa\\OC_2H_5\end{smallmatrix}$, welches mit einem zweiten Molekül Essigester Alkohol abspaltet und die Na-Verbindung des Acetessigesters erzeugt

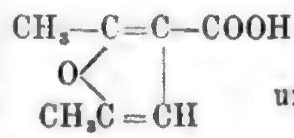
$$CH_3C\begin{matrix}\boxed{OC_2H_5 \quad H}\\ ONa \qquad\quad\\ \boxed{OC_2H_5 \quad H}\end{matrix}CH—COOR$$

Beim Ansäuern tritt teilweise Umlagerung in die Enolform ein (vgl. den Artikel „Tautomerie“). — Kondensation von Essigester und Ameisenester mit Na gibt Formylessigester; vgl. oben S. 807.

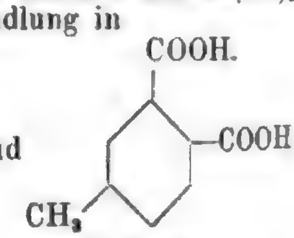
γ-Ketonsäuren: sie entstehen aus Acetbernsteinsäureester (aus Acetessigester-Na + Cl-Essigester) durch CO_2-Abspaltung. Einfacher aus Kohlehydraten mit Salzsäure unter bestimmten Bedingungen. Der Reaktionsmechanismus ist nicht aufgeklärt.

Durch derartige Acetessigestersynthesen sind zahlreiche Polyketosäuren und Ketopolysäuren darstellbar, z. B. Diacetessigester, Diacetbernsteinester, Acetylmalonester, Acetylbrenztraubensäureester, Oxalessigester usw.

α-Ketonsäuren. Es sind fast unzersetzt siedende Flüssigkeiten, zur Polymerisation neigend. Hauptvertreter Brenztraubensäure: spaltet sich mit verd. H_2SO_4 in CH_3CHO und CO_2 und wirkt daher bei vielen Kondensationen wie Aldehyd. Kondensierbar zu Benzolderivaten (wie Aceton), bei Gegenwart von NH_3 zu Pyridinderivaten. In Wasser, Alkohol, Aether löslich. Liefert bei elektrolytischer Oxydation Diacetyl + CO_2. Reduziert Ag-NH_3-Lösung, dabei entsteht Essigsäure + CO_2. Durch Kochen mit $Ba(OH)_2$ merkwürdige Umwandlung in



und



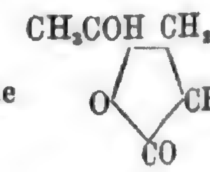
Uvinsäure (Pyrotitrarsäure) Uvitinsäure

β-Ketonsäuren. Hauptvertreter Acetessigsäure: frei sehr zersetzliche Flüssigkeit; Ester obstartig riechende Flüssigkeit, sehr leicht spaltbar nach 2 Richtungen (zwischen CH_2 und jeder der beiden CO-Gruppen):

$$CH_3COCH_2COOC_2H_5 \begin{cases} \longrightarrow CH_3COCH_3 + CO_2 + C_2H_5OH \text{ (Ketonspaltung)} \\ \longrightarrow CH_3COOH + CH_3COOH + C_2H_5—OH \text{ (Säurespaltung).} \end{cases}$$

Färbt Eisenchlorid violettrot, besitzt zwei reaktive, z. B. durch Na ersetzbare Methylen-H-Atome und ist daher zu zahllosen Synthesen verwendbar. — Mit HNO_2 entsteht CO_2 + i-Nitrosoaceton $CH_3COCH(NOH)$. — Das Alkalisalz des Acetessigesters erscheint im Harn bei anormalem Stoffwechsel.

γ-Ketonsäuren. Feste Körper, in Wasser löslich, nach Essigsäure riechend, schmelzen fast unzersetzt. Bilden bei Destillation ungesättigte Laktone: Lävulinsäure ⟶ Angelikalakton (vgl. S. 787). Durch Reduktion gehen sie in gesättigte Laktone über. Man kann sie darum auffassen als Oxylaktone

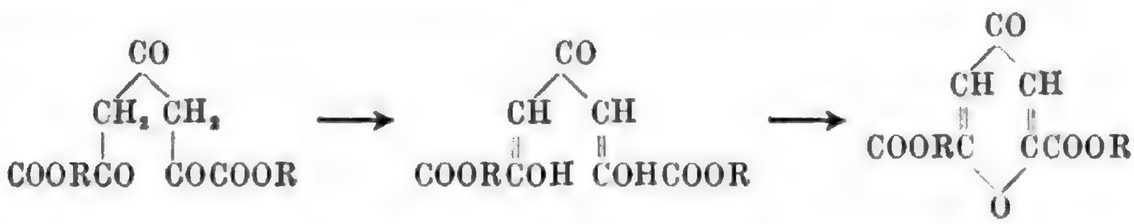


δ-Ketonsäuren. Beispiele: *γ*-Acetobuttersäure, aus Acetylglutarsäure erhältlich; gibt ein *δ*-Lakton.

Ketostearinsäure $CH_3(CH_2)_7CO(CH_2)_8$-COOH auf Umwegen aus Oelsäure erhältlich.

Ungesättigte Ketonsäuren. Von ungesättigten Ketonsäuren sei erwähnt die aus Benzol mit $KClO_3$ + Säure entstehende Tri-

chlorphenomalsäure $CCl_3COCH{=}CH{-}COOH$ (oder die Laktonform davon). — Ferner die aus Acetondioxalester als Anhydrid von dessen Diënolform gewinnbare Chelidonsäure = γ-Pyrondicarbonsäure, die unter anderen im Schöllkrautmilchsaft vorkommt:



Von den Ketonsäuren aus sind durch Reduktion ihrer Oxime die **Aminosäuren** zugänglich:

R	R	R
CO	C=NOH	$HCNH_2$
$(CH_2)_x$	$(CH_2)_x$	$(CH_2)_x$
COOH	COOH	COOH

Keton- und Aminosäuren sind auch im Organismus ineinander überführbar.

6. Stickstoffsubstituierte Säuren. Sie werden im Artikel „Ammoniakderivate" besprochen.

7. Polysubstituierte Säuren. Vgl. Anmerkung 2 auf S. 789.

II. Verbindungen mit umgebildeter COOH-Gruppe.

Uebersicht durch Beispiele:

1. H-Ersatz: **Salze** (Seifen, Pflaster)
   Ester (Fette, Wachse)
2. =O-Ersatz: Hydroxamsäure $R-C\left\langle{}^{NOH}_{OH}\right.$
3. H und =O-Ersatz: Imidoäther $R-C\left\langle{}^{NH}_{OR}\right.$
4. OH-Ersatz: **Säure-Halogenide** (Säure-Cyanide)
   Säure-Anhydride
   Persäuren, Peroxyde
   Säure-Amide, -Hydrazide, -Azide usw.
5. —O-Ersatz in OH: Thiosäuren RCOSH
6. OH- und =O-Ersatz: durch Halogen: Trichloride $R-CCl_3$
   durch Stickstoff: Nitrile $R-C{\equiv}N$
   Amidine $R-C\left\langle{}^{NH}_{NH_2}\right.$
7. Gemischter Ersatz durch
   Stickstoff und Halogen: Amid- und Imidchloride
   $RC\left\langle{}^{NH_2}_{Cl_2}\right.$ $RC\left\langle{}^{NH}_{Cl}\right.$
   Stickstoff und Sauerstoff: Amidoxime, Nitrolsäuren
   $RC\left\langle{}^{NOH}_{NH_2}\right.$ $RC\left\langle{}^{NOH}_{NO_2}\right.$
   Stickstoff und Schwefel: Thioamide usw.
   $RC\left\langle{}^{S}_{NH_2}\right.$

Von diesen Verbindungen werden im folgenden nur die im Druck hervorgehobenen besprochen, da die übrigen in den Artikeln „Ammoniakderivate", „Sulfoverbindungen", „Thioverbindungen" usw. abgehandelt werden.

1. Säurehalogenide (Chloride, Bromide, Jodide, Fluoride, Cyanide). Die wichtigste Darstellung ist die aus PCl_5 und Säurehydraten oder -anhydriden (in besonderen Fällen aus Salzen und Estern); als sonstige Chlorierungsmittel haben bisweilen Vorteile $POCl_3$, PCl_3, Thionylchlorid (u. a. anorganische Säurechloride): Acetylchlorid.

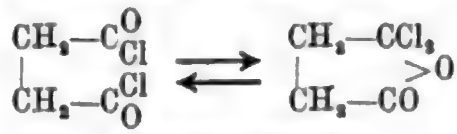
Mehr theoretisches Interesse besitzt die Bildungsmöglichkeit aus organischer Säure, HCl und P_2O_5, sowie aus Aldehyd + Chlor. An Stelle der Phosphorbromide und -jodide verwendet man Phosphor und Brom oder Jod. Die Jodide sind nur aus Säureanhydriden, nicht aus den Hydraten gewinnbar, oder aus Säurechloriden mit Ca- oder Mg-jodid; die Fluoride aus den Chloriden mit AgF. Säurecyanide (= α-Ketonsäurenitrile) erhält man aus Säure-Chlorid + AgCN, ferner aus 1,2-Aldoketonen mit NH_2OH unter Abspaltung von H_2O:

$$RCOC^{H}_{O} \longrightarrow RCOCH{=}NOH \longrightarrow RCOCN.$$

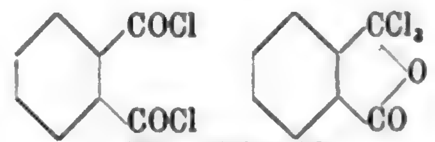
Spezialmethode für die aromatische Reihe: Benzoylchlorid aus Benzol, Phosgen $COCl_2$ und $AlCl_3$.

Die synthetisch zur Einführung von Säureresten, Acylen statt Wasserstoff (Acetylierung, Benzoylierung) äußerst bedeutungsvollen Säurehalogenide besitzen alle den gleichen charakteristisch stechenden Geruch und rauchen an der Luft. Sie sind schwerer als die Hydrate (z. B. Acetylchlorid d_4^{20} 1.105; Essigsäure d_4^{20} 1,051) und sind meist unzersetzt destillierende Flüssigkeiten, ab C_{18} feste Substanzen.

Die große Reaktivität der Säure-Chloride beruht auf der Fähigkeit der in ihnen enthaltenen Carbonyle zur Addition — der sekundär wieder Abspaltungen folgen können. —, sie zeigt sich daher vornehmlich gegenüber den Addenden für Sauerstoff, z. B. NH_3, H_2O, ROH, HCN (in Form von AgCN), während das Halogen andererseits, wie in anderen Verbindungen mit der Konfiguration X=CCl, nicht eigentlich leicht beweglich und austauschbar ist, so ist z. B. aus CH_3COCl mit Na kein Diacetyl $CH_3COCOCH_3$ gewinnbar (!). — Reaktionen der Säurechloride, bei denen Metalle beteiligt sind, treten nur bei Gegenwart von Wasser ein; die Säurehalogenide liefern z. B. keine Additionsverbindungen nach Grignard (mit Ausnahme derer der zweibasischen Säuren, deren Verhalten auch insofern abweicht, als sie Reaktionen tautomerer dichlorsubstituierter Laktone zeigen, z. B. durch Wasserstoff zu Laktonen reduziert werden:



Succinylchlorid



Phtalylchlorid.

Die Hydrolysierbarkeit zu den Hydraten ist nicht bei allen Gliedern der Klasse gleich groß, mit am größten ist sie bei CH_3COCl, das sich dabei stark erhitzt bis zum Kochen (55°), geringer bei C_6H_5COCl. Sie ist wohl zu deuten nicht als direkte Substitution:

$RC\overset{O}{\boxed{Cl \quad H}}OH$, sondern als eine Addition mit folgender Abspaltung:

$$RC^{O}_{Cl} + HOH \longrightarrow RC\overset{O-H}{\underset{OH}{Cl}} \longrightarrow RC^{O}_{OH} + HCl$$

Weitere Reaktionen von Bedeutung:

$$RC^{O}_{Cl} + 2NH_3 \longrightarrow RC^{O}_{NH_2} + NH_4Cl$$

$$RC^{O}_{Cl} + \text{ROH oder RONa} \longrightarrow \text{Ester}$$

$$RC^{O}_{Cl} + RCOONa \longrightarrow \underset{\text{Säureanhydrid}}{RCO{-}O{-}COR}$$

$$RC^{O}_{Cl} + H_2 \longrightarrow RC^{H}_{O} + HCl$$

$$RC^{O}_{Cl} + 2H_2 \longrightarrow RC^{H_2}_{OH} + HCl$$

$$RC^{O}_{Cl} + ZnR_2 \longrightarrow \text{Ketone oder sekundäre oder tertiäre Alkohole}$$

$$RC^{O}_{Cl} + AgCN \longrightarrow \text{Säurecyanide.}$$

Die letztgenannten Säurecyanide sind wenig beständig, gehen durch Verseifung mit Säure in α-Ketonsäure über, mit Wasser oder Alkali unter Spaltung in Blausäure und das betreffende Säurehydrat.

2. Säureanhydride. Die wichtigste Darstellung ist die aus dem Chlorid und dem Na-Salz der Säure (manchmal auch aus dem freien Hydrat):

$$RC^{O}_{Cl} + C^{O}_{ONa}{-}R \longrightarrow RCO{-}O{-}OCR,$$

und erfolgt bei gewöhnlicher Temperatur oder bei schwachem Erwärmen. Man kann die Isolierung des Säurechlorids umgehen und direkt das Salz mit $POCl_3$ (oder anderen anorganischen Säurechloriden) behandeln.

Die einfache Abspaltung von Wasser aus den Hydraten beginnt bisweilen schon beim Erhitzen, eventuell unter Zusatz von P_2O_5, bei höheren Säuren bewirkt man sie bequem durch Acetylchlorid als H_2O-abspaltendes Mittel. In besonderen Fällen sind aus Säurechloriden mit Chinolin oder Pyridin und mit wasserfreier Oxalsäure Anhydride gewonnen worden. Innere Anhydride mehrbasischer Säuren bilden sich nur da, wo 5 und 6 Ringsysteme entstehen können, also bei Säuren mit Ketten von 4 und 5 C-Atomen (Bernstein- und Glutaranhydrid und deren Homologe), außerdem bei o-Phtalsäure; ebenso bei den Cisformen der Stereoisomeren, z. B. bei Maleinsäure (die Trans- oder Fumarsäure gibt in allmählich eintretender Reaktion ebenfalls Maleinanhydrid); alkylierte Bernstein- und Glutarsäure spalten leichter Wasser ab, oft bei bloßem Erhitzen, als die Muttersubstanzen.

Oxalsäure liefert überhaupt kein Anhydrid, sondern gibt CO, CO_2 und H_2O. Malonsäure gibt analog CO_2 und Essigsäure; außerdem liefert sie mit P_2O_5 ein intramolekulares Anhydrid anderer Art, nämlich zwischen Carboxyl-OH und Methylensauerstoff:

$$C{<}^{CO}_{CO}$$ Kohlensuboxyd (B. Chem. Ges. 41, 1233).

Ueber die durch Erhitzen von Adipinsäure erhältlichen Produkte vgl. S. 800. — Gemischte Säureanhydride sind nur schwer rein erhältlich und zerfallen beim Destillieren in die einfachen.

Die geringe Löslichkeit der Säureanhydride in Wasser bewirkt, daß ihre Hydratisierung durchaus nicht sehr schnell fortschreitet, etwa wie bei anorganischen Anhydriden (SO_3, P_2O_5). Die Benzoylverbindung zeigt sich wieder beständiger, als die des Acetyls (vgl. oben „Säurechloride"). Unbeständig und leicht umzuwandeln ist z. B. Maleinsäureanhydrid. Manche sind nachweislich zunächst unverändert in Wasser löslich und erst allmählich tritt eine an der Zunahme der Leitfähigkeit merkbare H_2O-Aufnahme ein.

Reaktionen der Säureanhydride:

Mit Alkoholen entstehen Ester (Acetylierungsmittel für Alkohole, Polyalkohole [Zucker] und NH_3-Derivate):

$$(RCO)_2O + 2ROH \longrightarrow 2RCOOR + HOH.$$

An Aldehyd addieren sie sich unter Bildung der den Acetalen RCH^{OR}_{OR} analogen Säurederivate $CH_3CH{<}^{OOCCH_3}_{OOCCH_3}$

Aethylidendiacetat.

Mit PCl_5 entstehen Säurechloride.

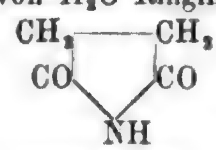
Mit freiem Chlor: Säurechloride + gechlorte Säuren.

Mit HCl bei 100°: Säurechloride + Säurehydrate.

Mit Na-Metall: Aldehyd und Alkohol; bei den ringförmigen: Laktone.

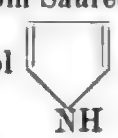
Mit NH_3: Säureamide und NH_4-Salz der Säure; bei ringförmigen entstehen unter Ringsprengung Aminsäuren, z. B.

$$\begin{array}{l} CH_2COOH \\ | \\ CH_2CONH_2 \end{array}$$ Succinaminsäure, die bei Entziehung von H_2O Ringimide, z. B.

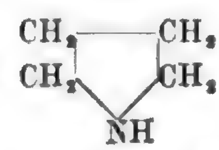


geben.

Letztgenannte Verbindung ist wichtig, weil das an N gebundene H-Atom Säurecharakter besitzt und zu Pyrrol



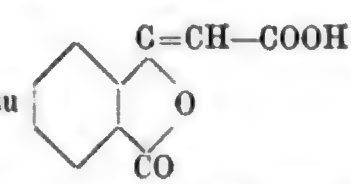
und Pyrrolidin



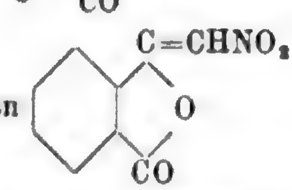
reduzierbar ist.

Kondensation von Phtal-, Bernstein-, Maleinanhydrid:

1. mit Säuren zu



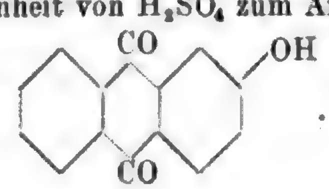
2. mit Nitromethan



,

3. mit Phenolen (Fluoresceinsynthese).

4. bei höherer Temperatur dagegen und Anwesenheit von H_2SO_4 zum Anthrachinonderivat

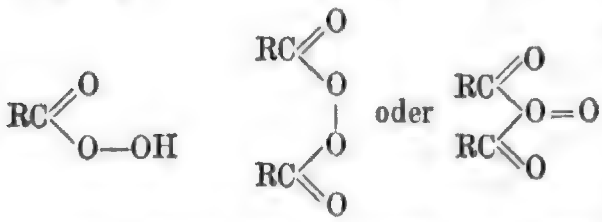


.

Die Säureanhydride sind unzersetzt (und zwar höher als die Hydrate) siedende neutrale Flüssigkeiten, in Wasser schwer löslich (wie die Aether). Die höheren sind zum Teil fest und gut kristallisierend, wie Succin- und Glutaranhydrid.

3. Persäuren (= Hydroperoxyde) und Säureperoxyde.

Persäuren (RCO_3H) Säureperoxyde ($R_2C_2O_4$)



Diese Verbindungen stehen zu den Säurehydraten und Anhydriden im Verhältnis des H_2O_2 zum H_2O. Peroxyde sind auffaßbar als Superoxyde der Säureradikale oder als gemischte Anhydride von Persäure und gewöhnlicher Säure. Der Zerfall mit Wasser verläuft dieser Annahme entsprechend.

Sie entstehen aus den Anhydriden oder Chloriden der Säuren (auch wohl den Hydraten) mit BaO_2, H_2O_2, $Na_2O_2 . H_2O$; Caroscher Säure, Ozon. Es sind dicke Flüssigkeiten oder fest kristallisierte Substanzen, löslich in Wasser (Persäuren mehr als Peroxyde), Alkohol und Aether.

Alle sind explosiv (die hochmolekularen weniger), zeigen stark oxydierende Eigenschaften (J wird aus KJ freigemacht, Indigo wird entfärbt), sind beständig gegen konz. HNO_3, und geben beim Erwärmen mit anderen Säuren und Laugen H_2O_2 ab. Die neutralen Peroxyde sind, wenn rein, geruchlos, die schwachsauren Persäuren riechen stechend, chlorkalkähnlich.

Persäuren entstehen intermediär auch bei Autoxydation der Aldehyde. — Ungesättigte Säuren bilden mit Ozon Ozonide von Persäuren $\underbrace{CH_2—CH}_{O_3}—(CH_2)_4—CO_3H$.

4. Salze. Zu den Säurederivaten mit umgebildetem Carboxyl gehören auch die durch Ersatz des typischen Wasserstoffs entstehenden Salze (Seifen, Pflaster), Ester (Fette, Wachse).

Da den Estern ein eigener Artikel gewidmet ist, ebenso den Seifen und Fetten (s. den Artikel „Fette") zusammen, so seien hier nur einige allgemeine Bemerkungen über Salze angefügt. Von einiger Bedeutung sind meist nur die der Alkalien, alkalischen Erden, des Kupfers, Silbers, Quecksilbers und Bleies.

Dem äußeren Habitus nach sind die Salze gut kristallisierende oder fettig schuppige, zerreibliche, manchmal auch klebende strukturlose Massen (fettsaures Blei — Bleipflaster).

Es existieren außer den neutralen und den bei zweibasischen Säuren außerdem zu findenden sauren Salzen, auch sogenannte übersaure Salze, z. B. K-acetat + 1 oder 2 Mol. Essigsäure, saures Alkalipalmitat u. a. saure Salze einbasischer Säuren; außerdem basische Salze, z. B. basisches Bleiacetat (Bleiessig). Die Existenz jener saueren Salze ist kein Anlaß an der einbasischen Natur der betreffenden Säuren zu zweifeln. Sie findet ihre genügende Erklärung darin, daß die Dampfdichten jener Säuren und besonders der Anfangsglieder bis weit über den Siedepunkt abnorm groß und auch in indifferenten Lösungsmitteln noch bimolekular sind, so daß in ihnen assoziierte Moleküle anzunehmen sind. Im Einklang damit ist die Löslichkeit der sauren Salze häufig viel geringer als die der neutralen.

Die Löslichkeit ist sehr verschieden, im großen und ganzen aber ähnlich wie bei den anorganischen Säuren, d. h. die größte Löslichkeit zeigen die Salze der Alkalimetalle, weniger die der alkalischen Erden,[1] noch weniger die der Schwermetalle. Sie nimmt außerdem ab mit dem Molekulargewicht der Säure, zu mit der Zahl der Hydroxylgruppen im Molekül.

Im Unterschied von den meisten anorganischen Salzen ist die Löslichkeit in heißem Wasser oft geringer als in kaltem (z. B. buttersaurer Kalk). Durch Zusatz gleichioniger Salze findet Löslichkeitsverminderung statt (Aussalzen der Seife durch Zusatz von NaCl). Beim Glühen geben alle Alkalisalze Alkalicarbonat. Bei den Cu-, Ag-, Hg-Salzen tritt häufig unter geeigneten Umständen intramolekular Oxydation des Säurerestes auf Kosten der in Form von Cu_2O, Ag, Hg ausgeschiedenen Metalle ein (Tartrate, Oxalate, Formiate, Salze der Brenztraubensäure und viele andere). Die Ionisierbarkeit der Na-Salze ist beträchtlich größer als die der freien Säure, deren Stärke daher durch reichlichen Zusatz des Alkalisalzes zurückgedrängt wird (Essigsäure bei Gegenwart von Na-acetat). Die Hydrolysierbarkeit der Salze ist bei den Alkaliacetaten (rein, frisch gelöst) erst in der Hitze deutlich, in der Kälte kaum bemerkbar.

Bei den höheren Fettsäuren (Seifen) ist sie sehr deutlich. Die Lösungen in Wasser (nicht die in Alkohol) reagieren deutlich alkalisch und trüben sich durch Ausscheidung von saurem Salz. Die leichte Hydrolysierbarkeit der Fe-, Cr-, Al-, Sn-Salze (vgl. die Acetate) bedingt ihre Anwendung als Färber-

[1] Niederschlag der fettsauren Alkalien (Seifen) mit kalkhaltigem Brunnenwasser.

beizen und zum Wasserdichtmachen der Gewebe. Häufig tritt zwischen Metall und Säurerest mehr oder minder Komplexbildung ein, z. B. Chromodiessigsäure (violett):

$$[Cr(OH)_2(CH_3COO)]\underbrace{(CH_3COO)_2}_{\text{ionisierbar.}}$$

Besonders häufig ist sie bei den polyhydroxylhaltigen Säuren (Kupfer mit Tartrat, Fehlingsche Lösung). Bekannt ist der dadurch bedingte störende Einfluß organischer Säuren in der anorganischen Analyse (Hinderung der Fällung von Fe, Al, Cr in der $(NH_4)_2S$-Gruppe).

Alle neutralen Acetate sind in Wasser löslich. Na-acetat auch in Alkohol.

NH_4-acetat; Material zur Gewinnung von Acetamid und Acetonitril.

Liq. Aluminii acetici; wirksames mildes Desinfiziens.

Liq. Plumbi subacetici, Bleiessig; offizinell.

Grünspan besteht aus basischem Cu-Carbonat.

Schweinfurter Grün ist essig-arsenigsaures Kupfer.

III. Derivate stammsubstituierter Säuren mit gleichzeitig umgebildeter Carboxylgruppe.

Dahin gehören Aminosäureamide (Asparagin, Glutamin u. a.), wie sie sich aus den Estern chlorierter Säuren mit NH_3 bilden, Chlorsäurechloride, wie man sie mit PCl_5 erhält aus Oxysäuren, weiterhin Anhydride von Aethersäuren (S. 805) usw. Der gewählten Einteilung entsprechend würden hierher zu zählen sein auch alle Salze und Ester substituierter Säuren.

Die Reaktionen aller dieser Verbindungen sind additiv die ihrer Bestandteile und bieten zu besonderen Ausführungen nicht Anlaß.

Literatur. *Lehr- und Handbücher:* **V. Meyer und P. Jacobson**, *Lehrbuch der organischen Chemie, 2. Aufl. Leipzig 1906.* — **F. Beilstein**, *Handbuch der organischen Chemie, 3. Aufl. Hamburg 1893 bis 1906.* — **V. v. Richter**, *Chemie der Kohlenstoffverbindungen. Bearbeitet von R. Anschütz und Schroeter. 10. Aufl. Bonn 1905.* — **A. Bernthsen und Mohr**, *Kurzes Lehrbuch der organischen Chemie, 10. Aufl. Braunschweig 1909.* — **Kraft**, *Organische Chemie. 4. Aufl. Wien 1905.* — **A. F. Hollemann**, *Lehrbuch der organischen Chemie. 9. Aufl. Leipzig 1911.* — **Roscoe-Schorlemmer**, *Organische Chemie (Teil 1 des ausführlichen Lehrbuchs der Chemie). Braunschweig 1884.* — **Lellmann**, *Prinzipien der organischen Synthese. Berlin 1887.* — **Euler**, *Grundlagen und Ergebnisse der Pflanzenchemie. Braunschweig 1908 und 1909.* **W. Fahrion**, *Die Chemie der trocknenden Oele. Berlin 1911.*

J. Hoppe.

12. Beschreibung einzelner wichtiger Säuren.

Carbonsäuren der aliphatischen Verbindungen.

Ameisensäure HCOOH, Acidum formicicum (Samuel Fischer und John Ray 1670; Marggraf), Fp. +8,6°, Sdp. (760 mm) 100,6°, $d^{20} = 1,22$, Verbrennungswärme (für die flüssige Säure) 1366 g-cal pro g; findet sich in freiem Zustand in Brennesseln, Fichtennadeln u. a., in Ameisen, in den Raupen des Prozessionsspinners (Bombyx processionea) im Schweiß und in anderen tierischen Sekreten. Aus diesen Substanzen kann sie durch Destillation mit Wasser gewonnen werden; sie entsteht auch bei der trockenen Destillation und bei der Oxydation gewisser organischer Stoffe, z. B. von Stärke (Scheele); auch bei deren Zersetzung durch konzentrierte H_2SO_4; in der Technik stellt man sie durch Erhitzen von Oxalsäure (mit Glycerin) her (Berthelot); die wasserfreie Säure erhält man durch Zerlegen des Bleisalzes durch H_2S bei 100°. Sie hat stechenden Geruch und erzeugt auf der Haut Blasen, ist in allen Verhältnissen mit Wasser, Alkohol und Aether mischbar; zerfällt bei 160° in CO_2 und H_2; bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt die gleiche Zersetzung unter dem Einfluß von pulverförmigem Rhodium, Iridium und Ruthenium, weniger leicht durch Einwirkung von Platinschwamm; sie zerfällt beim Erwärmen mit konzentrierter Schwefelsäure in CO und H_2O; reduziert entsprechend ihrer Aldehydnatur Silbersalzlösungen und Quecksilberoxyd, wobei sie selbst zu Kohlensäure oxydiert wird.

Formiate. Die Salze der Ameisensäure sind meist in Wasser leicht löslich; schwer löslich sind das Bleisalz $(HCOO)_2Pb$, glänzende Nadeln und das Silbersalz HCOOAg, das sich rasch am Licht schwärzt. Die Alkaliformiate liefern bei 250° Oxalate und Wasserstoff. Beim Erhitzen von Kaliumformiat mit Kaliumhydroxyd erhält man reinen Wasserstoff neben Kaliumcarbonat. Ammoniumformiat gibt beim Erhitzen auf 230° infolge Wasserabspaltung Formamid $HCOONH_2$.

Das Silber- und das Quecksilbersalz liefern beim Erhitzen Metall, Kohlendioxyd und Ameisensäure:

$$2HCOOAg = 2Ag + CO_2 + HCOOH$$

Essigsäure und ihre Homologen. Fettsäuren. Gesättigte Säuren C_nH_{2n+1}.

Essigsäure CH_3COOH, Aethansäure, Acidum aceticum; Fp. der festen wasserfreien Säure, des „Eisessigs“, 16,7°, Sdp. 118°,

$d^{20} = 1{,}0497$, Verbrennungswärme 3491 g-cal pro g. Die Essigsäure ist die am längsten bekannte Säure, da sie am leichtesten, z. B. beim freiwilligen Sauerwerden alkoholischer Flüssigkeiten, entsteht; als roher Weinessig war sie schon im Altertum bekannt; Holzessig erwähnte Glauber 1648; in konzentrierter Form stellte sie Stahl gegen 1700 her; Lavoisier erkannte, daß zur Ueberführung des Alkohols in Essigsäure Luft nötig ist, und daß deren Volumen sich dabei verringert; die Zusammensetzung der Essigsäure wurde 1814 durch Berzelius festgestellt.

Die Essigsäure findet sich im Pflanzenreich in freiem Zustand und in Form von Salzen und Estern; z. B. finden sich in den Samen bezw. Früchten von Heracleum giganteum und Sphondylium (Baerenklau) Essigsäureester des n-Hexyl- und des n-Octylalkohols. Die Essigsäure entsteht bei der Verwesung vieler organischer Substanzen und infolge ihrer Beständigkeit gegen Oxydationsmittel bei der Oxydation zahlreicher Kohlenstoffverbindungen, ferner bei der trockenen Destillation von Holz, Zucker, Weinsäure usw.

Gewinnung. 1. Durch Oxydation von Aethylalkohol. Diese Oxydation erfolgt an der Luft bei alkoholhaltigen Flüssigkeiten durch Vermittelung der sogenannten Essigmutter, d. h. des Essigpilzes Mycoderma aceti, Micrococcus aceti oder Bacterium aceti, dessen Keime sich immer in der Luft befinden (Pasteur). Diese sogenannte Essiggärung (siehe den Artikel „Gärung") tritt ein beim Sauerwerden von Bier, Wein oder Obstsäften unter Entstehung von Bier-, Weinbezw. Obstessig. Bei der 1823 von Schützenbach erfundenen Schnellessigfabrikation wird durch außerordentliche Vergrößerung der Berührungsfläche zwischen alkoholhaltiger Flüssigkeit und Luft die Gärung erheblich beschleunigt. Große Bottiche, die sogenannten Essigständer, werden mit Hobelspänen gefüllt, und auf diese werden dann die etwa 10-prozentigen alkoholischen Lösungen, das sogenannte Essiggut, aufgegossen; der untere seitliche Teil des Bottichs enthält Löcher, welche der Luft den Zutritt ins Innere gestatten; die durch einen Siebboden laufende, im untersten Teile angesammelte Flüssigkeit wird noch mehrmals aufgegossen, bis die Oxydation möglichst vollständig ist.

2. Durch trockene Destillation von Holz in gußeisernen Retorten (Holzessigfabrikation). Das Destillat (Holzessig), welches Wasser, Essigsäure, Methylalkohol, Aceton u. a. enthält, wird durch Neutralisation mittels Soda und Eindampfen auf Natriumacetat verarbeitet, aus dem durch Destillation mit Schwefelsäure die Essigsäure abgeschieden wird.

Verhalten. Essigsäure mischt sich in allen Verhältnissen mit Wasser. Der gewöhnliche Essig enthält 5 bis 15% Essigsäure in Wasser. Reine Essigsäure darf einen Tropfen Kaliumpermanganatlösung nicht entfärben. Der durch Gärung gewonnene Essig enthält meist kleine Mengen von Alkohol, Weinsäure, Bernsteinsäure, Estern, Eiweißstoffen usw. Die reine Säure ist sehr hygroskopisch, wirkt auf der Haut stark ätzend, löst Schwefel Phosphor und viele organische Verbindungen, bildet beim Mischen mit Wasser, wie Kontraktion usw. erkennen läßt, ein Hydrat $CH_3C(OH)_3$ (Orthoessigsäure). Die Dampfdichte ist erst oberhalb 250° normal, in der Nähe des Siedepunktes enthält der Dampf zum großen Teil Doppelmolekeln.

Acetate. Die neutralen Salze der Essigsäure sind in Wasser löslich. — Kaliumacetat CH_3COOK, weiße zerfließliche Blätter; auch saure und mehrfach saure Kaliumacetate sind bekannt. — Natriumacetat $CH_3COONa + 3aq.$, verwitternde rhombische Säulen (Terra foliata tartari crystallisabilis). — Ammoniumacetat CH_3COONH_4 kristallinische Masse, dient als schweißtreibendes Arzneimittel (Liquor ammonii acetici). Das feste Salz gibt beim Destillieren Acetamid CH_3CONH_2. Die Lösung verliert beim Erhitzen Ammoniak. — Calciumacetat $(CH_3COO)_2Ca + aq.$ und Baryumacetat $(CH_3COO)_2Ba + aq.$ sind beide leicht in Wasser löslich. — Ferroacetat $(CH_3COO)_2Fe$ oxydiert sich in wässeriger Lösung leicht unter Bildung von unlöslichem basischem Ferriacetat. — Ferriacetat $(CH_3COO)_6Fe_2$ entsteht beim Mischen von Ferrisalzlösung mit Natriumacetatlösung; aus der tief braunroten Flüssigkeit wird beim Erhitzen ein basisches Salz abgeschieden; die Lösung eines basischen Salzes findet als Liquor ferri subacetici offizinelle Verwendung. — Aluminiumacetat $(CH_3COO)_6Al_2$ verhält sich analog dem Ferriacetat; die Eisen- und Aluminiumacetate werden in der Färberei und in der Kattundruckerei als Beizen verwendet. Ihre Wirkung beruht auf der leichten z. B. durch Dämpfen erzielbaren Abscheidung von basischen Salzen auf der Baumwollfaser, die Farbstoffe zu binden vermögen. Aluminiumacetat (enthalten in der sogenannten essigsauren Tonerde, Liquor aluminii acetici) wird in der Medizin zu Desinfektionszwecken, als Adstringens gegen Ruhr usw. verwendet. Neutrales Bleiacetat $(CH_3COO)_2Pb + 3aq.$, glänzende verwitternde Prismen, entsteht durch Auflösen von Bleiglätte Pb_2O_2 in Essigsäure, hat süßlichen Geschmack („Bleizucker") ist und giftig; beim Kochen von Bleizuckerlösung mit Bleiglätte entstehen basische Salze, deren Lösung als Bleiessig Verwendung findet (Goulard-

sches Wundwasser). Sie scheiden bei der Einwirkung von Kohlensäure basische Bleicarbonate ab (Bleiweißfabrikation). — Kupferacetat $(CH_3COO)_2Cu$ + aq.; dunkelgrüne Kristalle, bildet basische Salze (Grünspan), die durch Behandlung von Kupferplatten mit Essigsäure bei Luftzutritt gewonnen werden. Essigsaures und arsenigsaures Kupfer bilden das sogenannte Schweinfurter Grün. — Silberacetat CH_3COOAg glänzende Nadeln.

Kaliumacetat liefert bei der Elektrolyse Aethan, Natriumacetat mit Natronkalk erhitzt gibt Methan, Kaliumacetat mit arseniger Säure erhitzt liefert Kakodyloxyd. Ammoniumacetat gibt beim Erhitzen infolge Wasserabspaltung Acetamid. Calciumacetat gibt beim Erhitzen Aceton.

Nachweis. 1. Beim Erwärmen eines Acetats mit Alkohol und Schwefelsäure entsteht der angenehm riechende Essigäther, 2. durch Auftreten des Kakodylgeruchs beim Erhitzen von arseniger Säure mit Natriumacetat. 3. durch das charakteristische Silbersalz.

Propionsäure CH_3CH_2COOH, Methylessigsäure, Propansäure, Sdp. 141°, Verbrennungswärme 4961 g-cal pro g, entsteht u. a. durch Spaltpilzgärung aus äpfelsaurem und milchsaurem Kalk; sie wird aus der wässerigen Lösung durch $CaCl_2$ als Oel abgeschieden und ist die erste Säure dieser Reihe, die sich im Verhalten den höheren Fettsäuren nähert; daher ihr Name, den Dumas von πρῶτος = der erste und πίων = fett ableitete. Das Baryumsalz $(CH_3CH_2COO)_2Ba$ + aq. bildet Prismen, das Silbersalz CH_3CH_2COOAg ist in Wasser schwer löslich.

Buttersäuren $C_4H_8O_2$; zwei Isomere:

1. Normale Buttersäure $CH_3CH_2CH_2$-COOH, Aethylessigsäure, Gärungsbuttersäure, Butansäure; Sdp. 163°, Verbrennungswärme 5953 g-cal pro g; findet sich frei im Schweiß, in Exkrementen, in der Fleischflüssigkeit; als Hexylester im Oel von Heracleum giganteum, als Octylester im Oel von Pastinaca sativa; als Glycerinester in der Kuhbutter (bis 5%), in der sie von Chevreul 1814 aufgefunden wurde; sie bildet sich bei der durch Spaltpilze hervorgerufenen Buttersäuregärung von Glycerin, Milchsäure, Zucker, Stärke u. a., ferner bei der Oxydation und der Verwesung von Eiweißstoffen, ist daher z. B. im Limburger Käse enthalten. Zur technischen Gewinnung leitet man die Buttersäuregärung von Glyzerin, Zucker oder Stärke durch faulenden Käse oder dgl., besser durch Einsaat von Spaltpilzen (Schizomyceten, besonders der Buttersäurebazillen Bacillus subtilis oder Bacillus boocopricus) ein. Die Buttersäure ist eine dicke, ranzig riechende Flüssigkeit, die in Wasser und Alkohol leicht löslich ist und aus den Lösungen durch Salze „ausgesalzen" wird. Das Calciumsalz $(CH_3CH_2CH_2COO)_2Ca$ + aq, bildet glänzende Blättchen und ist in der Kälte leichter löslich als in der Wärme.

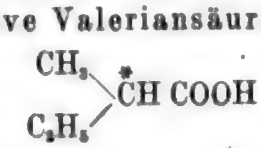
2. Isobuttersäure $(CH_3)_2CHCOOH$. Dimethylessigsäure, Methylpropansäure, Sdp. 154°; findet sich frei im Johannisbrot (den Schoten von Ceratonia siliqua), in der Wurzel von Arnica montana; als Aethylester im Crotonöl von Croton Tiglium, als Octylester im Oel von Pastinaca sativa; sie ist der normalen Buttersäure sehr ähnlich, löst sich aber schwerer in Wasser; ihr Calciumsalz $[(CH_3)_2CHCOO]_2Ca$ + 5 aq. ist in heißem Wasser leichter löslich als in kaltem.

Valeriansäuren $C_5H_{10}O_2$; vier Isomere:

1. Normale Valeriansäure CH_3CH_2-CH_2CH_2COOH, n-Propylessigsäure, Pentansäure, Sdp. 186°; ist in Wasser schwer löslich.

2. Isovaleriansäure $(CH_3)_2CHCH_2$-COOH, Isopropylessigsäure, 3-Methylbutansäure, Sdp. 175°; findet sich (meist mit Methyläthylessigsäure zusammen) frei und in Form von Estern in der Baldrianwurzel von Valeriana officinalis, in der Angelicawurzel von Angelica Archangelica (Engelwurz), in den Beeren von Viburnum opulus (Schneeball); im Fußschweiß, im Delphintran (Chevreul 1817); sie ist eine ölige, sauer (nach Baldrian) riechende, ätzend wirkende Flüssigkeit; technisch gewinnt man sie durch Auskochen der genannten Wurzeln mit Na_2CO_3; ihre Salze fühlen sich meist fettig an, was eine ziemlich allgemeine Eigenschaft der Salze höherer Fettsäuren ist.

3. Aktive Valeriansäure



($\overset{*}{C}$ = asymmetrisches Kohlenstoffatom; vgl. den Artikel „Drehung der Polarisationsebene"). Methyläthylessigsäure, 2-Methylbutansäure, Sdp. 175°; findet sich in der Natur neben Isovaleriansäure; die aus dem l-Amylalkohol durch Oxydation entstehende Säure ist rechtsdrehend; diese d-Säure entsteht ferner bei der Spaltung des Convolvulins; die synthetisch hergestellte inaktive Methyläthylessigsäure ist durch die Brucinsalze in die beiden aktiven Komponenten spaltbar; das spezifische Drehungsvermögen beträgt $[\alpha]_D = \pm 17^0\ 85'$.

4. Trimethylessigsäure $(CH_3)_3CCOOH$, Pivalinsäure, Dimethylpropansäure, Fp. 35°, Sdp. 164°; entsteht u. a. bei der Oxydation des Pinacolins; riecht ähnlich wie Essigsäure.

Höhere Fettsäuren. In den natürlichen Fetten, Oelen und Wachsarten kommen fast ausschließlich die normalen (n-) Säuren

mit einer geraden Anzahl von C-Atomen als Glyzerinester bezw. als Ester einwertiger Alkohole vor. Im folgenden werden einige n-Säuren kurz besprochen; besonders wichtig (aus technischen Gründen) sind die Palmitin- und die Stearinsäure.

n-Capronsäure $CH(_3CH_2)_4COOH$, n-Hexylsäure, Fp. 8°, Sdp. 205°; findet sich als Glyzerinester in der Kuhbutter, in der Ziegenbutter, im Kokosnußöl; entsteht bei der Buttersäuregärung neben Buttersäure; riecht unangenehm ranzig und schweißartig.

Oenanthylsäure $CH_3(CH_2)_5COOH$, n-Heptylsäure, Fp. — 10,5°, Sdp. 223°; entsteht bei der Oxydation des Oenanthols und des Rizinusöls.

Caprylsäure CH_3-$(CH_2)_6COOH$, n-Octylsäure, Fp. 16,5°, Sdp. 237°; findet sich im Weinfuselöl, ferner als Glycerinester in der Ziegenbutter und im Kokosnußöl.

Pelargonsäure $CH_3(CH_2)_7COOH$, n-Nonylsäure Fp. 12,5°, Sdp. 254°; findet sich in den Blättern von Pelargonium roseum; entsteht bei der Oxydation der Oelsäuren und des Rautenöls.

Caprinsäure $CH_3(CH_2)_8COOH$, n-Decylsäure, Fp. 31,4°, Sdp. 270°; findet sich als Glycerinester in Kuh- und Ziegenbutter, Kokosnußöl und vielen Fetten, als Amylester im Fuselöl.

n-Undecylsäure $CH_3(CH_2)_9COOH$, Fp. 28,5°, Sdp. (100 mm) 212,5; entsteht durch Reduktion der bei der Vakuumdestillation des Rizinusöls sich bildenden Undecylensäure.

Laurinsäure $CH_3(CH_2)_{10}COOH$, n-Dodecylsäure, Fp. 43,5°, Sdp. (100 mm) 225°; findet sich als Glycerinester in den Früchten des Lorbeers Laurus nobilis; in der Kokosnußbutter, in den Pichurimbohnen von Nectandra (Lauracee); als Cetylester im Walrat.

Myristinsäure $CH_3(CH_2)_{12}COOH$, n-Tetradecylsäure, Fp. 53,8°, Sdp. (100 mm) 220,5°; findet sich als Glycerinester in der Muskatbutter, als Cetylester in dem Myristin, auch einem Bestandteil der Muskatfrüchte von Myristica moschata, im Walrat, im Kokosnußöl, in den Erdmandeln, der Rindergalle; als Methylester sowie als freie Säure in der Iriswurzel.

Palmitinsäure $CH_3(CH_2)_{14}COOH$, n-Hexadecylsäure, Fp. 62°, Sdp. (100 mm) 278,5°, Verbrennungswärme 9353 g-cal pro g; ihr Glycerinester bildet mit dem der Stearinsäure und dem der Oelsäure den Hauptbestandteil der festen tierischen Fette; das Palmöl enthält neben dem Glycerinester auch freie Palmitinsäure; der Cetylester ist im Walrat (Pottwal-Fett, sperma ceti, Cetaceum), der Myricylester im Bienenwachs enthalten; technisch gewinnt man die Palmitinsäure aus dem Olivenöl, das ein Gemisch von den Glycerinestern der Palmitin- und der Oelsäure ist, ferner aus dem japanischen Bienenwachs, das aus ziemlich reinem Palmitinsäureglycerinester besteht.

Margarinsäure $CH_3(CH_2)_{15}COOH$, n-Heptadecylsäure, Fp. 59,9°, Sdp. (100 mm) 280,5°; scheint im Gegensatz zu älteren Ansichten nicht in den Fetten vorzukommen.

Stearinsäure $CH_3(CH_2)_{16}COOH$, n-Octodecylsäure, Fp. 69,2°, Sdp. (100 mm) 291°, Verbrennungswärme ca. 9400 g-cal pro g; findet sich in großen Mengen als Glycerinester in den festen Fetten, den Talgarten (στέαρ = Talg) neben den Glyceriden der Palmitin- und der Oelsäure. Gips mit flüssiger Stearinsäure durchtränkt bildet die sogenannte „Elfenbeinmasse".

Arachinsäure $CH_3(CH_2)_{18}COOH$, Fp. 75°; findet sich im Erdnußöl von Arachis hypogaea (Erdeichel), ist vielleicht identisch mit der aus Kakaobutter erhaltenen Theobromsäure.

Behensäure $CH_3(CH_2)_{20}COOH$, Fp. 83°; findet sich im Behenöl aus Moringa arabica.

Lignocerinsäure $CH_3(CH_2)_{22}COOH$; findet sich im Buchenholzteer und im Erdnußöl.

Cerotinsäure $CH_3(CH_2)_{24}COOH$, Fp. 78°; findet sich frei im Bienenwachs, bildet als Cerylester den Hauptbestandteil des chinesischen Wachses (cera = Wachs).

Melissinsäure $CH_3(CH_2)_{28}COOH$, Fp. 90°; findet sich frei im Bienenwachs.

Oelsäuren, Olefinmonocarbonsäuren. Ungesättigte Säuren $C_n H_{2n-1} COOH$.

Acrylsäure $CH_2 = CHCOOH$, Propensäure, Fp. 10°, Sdp. 141°; riecht ähnlich wie Essigsäure; ist mit Wasser mischbar; bei langem Stehen polymerisiert sie sich; gibt in der Wärme mit naszierendem Wasserstoff ($Zn + H_2SO_4$) Propionsäure, mit Halogenwasserstoff β-substituierte Propionsäure, mit Brom αβ-Dibrompropionsäure, mit schmelzendem Alkali Essigsäure und Ameisensäure.

Crotonsäuren C_3H_5COOH:

Gewöhnliche Crotonsäure $\begin{matrix} CH_3 \\ H \end{matrix}\!\!>C=C<\!\!\begin{matrix} OCOH \\ H \end{matrix}$

Fp. 72°, Sdp. 180°; feine Nadeln oder große Tafeln, ziemlich löslich in Wasser; riecht buttersäureartig; findet sich im rohen Holzessig; die wässerige Lösung reduziert alkalische Silberlösung in der Wärme; gibt mit naszierendem Wasserstoff ($Zn + H_2SO_4$) n-Buttersäure, mit HBr und HJ β-substituierte Buttersäuren, mit Chlor und Brom αβ-Dihalogenbuttersäuren; beim Schmelzen mit Alkali Essigsäure, mit Permanganat Dioxybuttersäure, mit HNO_3 Essigsäure und Oxalsäure.

Isocrotonsäure $\begin{matrix} H \\ CH_3 \end{matrix}\!\!>C=C<\!\!\begin{matrix} COOH \\ H \end{matrix}$

Fp. 15°, Sdp. (23 mm) 75°, Allocrotonsäure, Cistrans-Crotonsäure, Quartenylsäure; ist stereoisomer mit der gewöhnlichen Crotonsäure; geht beim Erhitzen auf 170—180° in gewöhnliche Crotonsäure über (teils auch schon bei der Destillation); gibt mit HJ β-Jodbuttersäure; mit Chlor Iso-αβ-Dichlorbuttersäure, mit Permanganat Isodioxybuttersäure.

Vinylessigsäure $CH_2 = CHCH_2COOH$, Sdp. (13 mm) 71°; ist mit Wasserdampf flüchtig; geht beim Kochen mit Säuren in gewöhnliche Crotonsäure, beim Kochen mit NaOH in gewöhnliche Crotonsäure und β-Oxybuttersäure über; mit Brom liefert sie βγ-Dibrombuttersäure.

Methylacrylsäure $CH_2=C<\!\!\begin{matrix} CH_3 \\ COOH \end{matrix}$,

Methylpropensäure, Fp. 16°, Sdp. 160,5°; leicht löslich in Wasser; kommt im Römisch-Kamillenöl aus Anthemis nobilis vor; polymerisiert sich beim Aufbewahren; durch Natriumamalgam wird sie in Isobuttersäure, durch HBr und HJ in α-Halogenisobuttersäure, durch Brom in αβ-Dibromisobuttersäure übergeführt; beim Schmelzen mit Alkali gibt sie Propionsäure und Ameisensäure.

Die vier Crotonsäuren lassen sich gut durch ihre Anilide unterscheiden.

Pentensäuren C_4H_7COOH:

Angelicasäure $\frac{H}{CH_3}\!>C=C<\!\frac{COOH}{CH_3}$,

Fp. 45°, Sdp. 185°; ist leicht löslich in heißem Wasser und mit Wasserdämpfen flüchtig; findet sich frei in der Angelicawurzel von Angelica archangelica; als Butyl- und Amylester im Römisch-Kamillenöl.

Tiglinsäure $\frac{CH_3}{H}\!>C=C<\!\frac{COOH}{CH_3}$,

Fp. 64,5°, Sdp. 148°; ist stereoisomer mit der Angelicasäure; findet sich als Glycerinester im Römisch-Kamillenöl und im Crotonöl aus Croton tiglium.

Propylidenessigsäure $CH_3CH_2CH=CH\text{-}COOH$, αβ-Pentensäure, Fp. 10°, Sdp. 201°.

Aethylidenpropionsäure $CH_3CH=CHCH_2\text{-}COOH$, βγ-Pentensäure, Sdp. 194°.

α-Aethylacrylsäure $CH_2=C(C_2H_5COOH)$, Fp. 45°, Sdp. 180°; gibt beim Erwärmen mit konz. H_2SO_4 unter teilweiser Zersetzung Tiglinsäure.

ββ-Dimethylacrylsäure $(CH_3)_2C=CHCOOH$, Fp. 60°.

Allylessigsäure $CH_2=CHCH_2CH_2COOH$, Sdp. 187°.

Hexensäuren C_5H_9COOH:

Hydrosorbinsäure $CH_3CH_2CH=CHCH_2\text{-}COOH$, Propylidenpropionsäure, βγ-Hexensäure; Sdp. 208°; gibt beim Kochen mit Natronlauge die

Isohydrosorbinsäure $CH_3CH_2CH_2CH=CHCOOH$, Butylidenessigsäure, αβ-Hexensäure, Fp. 33°, Sdp. 216°.

Brenzterebinsäure $(CH_3)_2C=CHCH_2\text{-}COOH$ und die zu den Heptensäuren gehörende

Teracrylsäure $C_3H_7CH=CHCH_2COOH$, Sdp. 218° sind wegen ihres Zusammenhangs mit Oxydationsprodukten des Terpentinöls von Wichtigkeit.

Undecylensäure $CH_2=CH(CH_2)_8COOH$, Fp. 24,5°, Sdp. (15 mm) 165°, entsteht bei der Destillation des Ricinusöls im Vacuum.

Oelsäure $\frac{C_8H_{17}}{H}\!>C=C<\!\frac{H}{(CH_2)_7COOH}$,

Oleïnsäure; Fp. 14°, Sdp. (10 mm) 223°; geruchlos; findet sich als Glycerinester, Trioleïn, in den meisten Fetten und besonders in den fetten, nicht trocknenden Oelen, wie Baumöl (Olivenöl), Rapsöl, Rüböl, Mandelöl, Eieröl, Fischtran (vgl. den Artikel „**Fette und Oele**"); Nebenprodukt bei der Stearinsäurefabrikation. Ihr Bleisalz ist in Aether löslich, wodurch sie sich von Palmitin- und Stearinsäure trennen läßt. Sie oxydiert sich beim Stehen an der Luft unter Gelbfärbung und zeigt dann einen ranzigen Geruch; mit HNO_3 gibt sie alle homologen n-Fettsäuren zwischen Essigsäure und Caprinsäure, daneben auch zweibasische Säuren, wie Korksäure; durch Reduktion mittels Wasserstoff und feinverteiltem Nickel geht sie in Stearinsäure über; beim Schmelzen mit Alkali liefert sie (ebenso wie die Elaïdinsäure und die Isoölsäure) Palmitinsäure und Essigsäure; salpetrige Säure führt sie über in die wahrscheinlich stereoisomere

Elaïdinsäure $\frac{C_8H_{17}}{H}\!>C=C<\!\frac{(CH_2)_7COOH}{H}$,

Fp. 51°, Sdp. (10 mm) 225°.

Isoölsäure, Fp. 44—45°, ist zu diesen beiden Säuren wahrscheinlich strukturisomer.

Erucasäure

$\frac{C_8H_{17}}{H}\!>C=C<\!\frac{H}{C_{11}H_{22}COOH}$,

Brassinsäure, Fp. 33 bis 34°, Sdp. (10 mm) 254,5°, findet sich als Glycerinester im Rüböl von Brassica campestris (Rübenraps), im fetten Oel des Senfsamens und der Traubenkörner; durch salpetrige Säure entsteht aus ihr die wahrscheinlich stereoisomere

Brassidinsäure $\frac{H}{C_8H_{17}}\!>C=C<\!\frac{H}{H_{11}H_{22}COOH}$,

Fp. 66°, Sdp. (10 mm) 256°.

Der Oelsäure sehr ähnlich sind die beiden folgenden Säuren aus anderen Reihen:

Leinölsäure $C_{18}H_{32}O_2$, Linolsäure, eine zweifach ungesättigte Säure; findet sich als Glycerinester in den trocknenden Oelen (die durch Oxydation an der Luft fest werden) wie Leinöl, Hanföl, Nußöl, Mohnöl u. a.

Rizinusölsäure $C_{18}H_{34}O_3 = CH_3\text{-}(CH_2)_5\overset{*}{C}H(OH)CH_2CH=CH(CH_2)_7COOH$, Rizinolsäure, optisch aktiv, $[\alpha]_D = +6{,}67°$; findet sich als Glycerinester im Rizinusöl; ihr Bleisalz löst sich in Aether.

Ungesättigte Säuren $C_nH_{2n-3}COOH$.

1. Acetylencarbonsäuren.

Propiolsäure $CH\equiv C.COOH$ Propargylsäure, Propinsäure, Fp. 6°, Sdp. 144° (unter Zersetzung); riecht nach Essigsäure; löst sich leicht in Wasser, Alkohol und Aether; reduziert Silber- und Platinsalze; ammoniakalische Silbernitrat- und Kupferchlorürlösungen fällen aus der wässerigen Lösung der Säure explosive Metallverbindungen. Im Licht polymerisiert sich die Propiolsäure zu Trimesinsäure $C_6H_3(COOH)_3$; Natriumamalgam führt sie in Propionsäure, Halogenwasserstoff in β-Halogenacrylsäuren, Halogen in αβ-Dihalogenacrylsäuren über.

Tetrolsäure $CH_3C\equiv C.COOH$, Fp. 76°, Sdp. 203°, zerfällt bei 210° in CO_2 und Allylen $CH_3C\equiv CH$.

2. Diolefincarbonsäuren.

Butadiencarbonsäure $CH_2=CHCH=CHCOOH$, Fp. 102°, und

β-Vinylacrylsäure $CH_2=CHCH=CHCOOH$, Fp. 80°, sind wahrscheinlich stereoisomer.

Sorbinsäure $CH_3CH=CHCH=CHCOOH$, Fp. 134,5°, Sdp. 228°; entsteht aus dem Sorbinöl von Sorbus aucuparia (Vogelbeere), einem Lacton, durch Behandeln mit NaOH oder HCl.

Geraniumsäure $C_{10}H_{16}O_2$.

Oxysäuren, Alkoholsäuren $C_nH_{2n}\left<\begin{matrix}COOH\\OH\end{matrix}\right.$

α-Oxycarbonsäuren.

Kohlensäure (OH)COOH, Oxyaminsäure (vgl. den Artikel „Kohlensäurederivate").

Glycolsäure $CH_2(OH)COOH$, Oxyessigsäure, Aethanolsäure (von Strecker 1848 aus Glycocoll erhalten); Fp. 70°; sehr leicht löslich in Wasser und Alkohol; kristallisiert gut aus Aceton; findet sich in den unreifen Weintrauben und in den Blättern von Ampelopsis hederacea (wilder Wein); durch HNO_3 wird sie zu Oxalsäure oxydiert. Die Alkalisalze sind zerfließlich, das Ca- und das Cu-Salz schwer in Wasser löslich.

Milchsäuren $C_2H_4(OH)COOH$:

Inaktive Milchsäure, Gärungsmilchsäure $CH_3CH(OH)COOH$, [d + l]-Milchsäure, α-Oxypropionsäure, Aethylidenmilchsäure, 2-Propanolsäure (Scheele, Liebig, Würtz, Kolbe, Kekulé); Fp. 18°, Sdp. (12 mm) 120°; findet sich im Tausendgüldenkraut, in der sauren Milch, im Magensaft, im Sauerkraut; sie ist optisch inaktiv; sehr hygroskopisch; der (durch Wasseranziehung entstehende) Sirup liefert bei rascher Vakuumdestillation die reine Säure, zerfällt aber über konz. H_2SO_4 im Exsikkator teilweise in das feste Anhydrid und Wasser, ohne daß sich kristallisierte Säure abscheidet. Beim Erhitzen zersetzt sie sich zu Lactid, Kohlenoxyd und Wasser; beim Erhitzen mit verdünnter H_2SO_4 auf 130° liefert sie Ameisensäure und Aldehyd; bei der Oxydation mit Chromsäure gibt sie Essigsäure und Kohlendioxyd; HBr führt sie in α-Brompropionsäure, HJ in Propionsäure über.

Milchsäuregärung. Zuckerlösungen vergären bei 45 bis 55° unter Einwirkung des Milchsäurebazillus Bacillus acidi lactici, der sich in faulendem Käse findet, zu Milchsäure: $C_6H_{12}O_6 = 2C_3H_6O_3$. Der Bazillus ist sehr empfindlich gegen freie Säure, man setzt deshalb Zink- oder Calciumkarbonat zu und erhält die Milchsäure in Form der entsprechenden Salze. Bei zu langer Dauer des Gärungsprozesses geht unter Einwirkung eines anderen Bazillus die Milchsäure in Buttersäure über (Buttersäuregärung). Die Milchsäuregärung tritt sowohl bei Rohr- und Milchzucker, wie auch bei Gummi und Stärke ein (siehe auch den Artikel „Gärung").

Optisch-aktive Milchsäuren (vgl. den Artikel „Drehung der Polarisationsebene"). Die Milchsäure enthält ein asymmetrisches C-Atom: $CH_3\overset{*}{C}H(OH)COOH$; die Spaltung der inaktiven Säure kann mittels der Strychnin-, Morphin- oder Chininsalze geschehen. Außerdem wird die linksdrehende Form von Penicillium glaucum weit schneller zerstört, als die rechtsdrehende; bringt man diesen Spaltpilz in Lösungen der inaktiven Säure oder besser ihres Ammoniumsalzes, so wird die Lösung allmählich rechtsdrehend.

[d]-Milchsäure, Rechts-Milchsäure, Fleischmilchsäure, Paramilchsäure; findet sich in der Muskelflüssigkeit (Berzelius 1808); ihre Verschiedenheit von der Gärungsmilchsäure wurde 1847 von Liebig nachgewiesen; sie entsteht auch als Nebenprodukt bei der Buttersäuregärung (vgl. S. 815) durch den sogenannten Granulobazillus.

[l]-Milchsäure, Links-Milchsäure, entsteht bei der Spaltung von Rohrzuckerlösung durch den Bacillus acidi laevolactici.

[d]- und [l]Milchsäure, Fp. 26°, sind sehr hygroskopisch; $[\alpha]_D$ für 1,24%ige Lösung: ± 2,24°. Durch Alkalien werden beide Säuren in die racemische [d + l]-Säure übergeführt, die [l]-Form sehr rasch, die [d]-Form langsamer.

Lactate. [d + l]-Calciumlactat $[C_2H_4(OH)COO]_2Ca$ + 5 aq., mikroskopische, zu Warzen vereinigte Nadeln, [d + l]-Zinklactat (3 aq.), glänzende Nadeln, und [d + l]-Ferrolactat (3 aq.), hellgelbe Nadeln, werden in der Medizin verwendet. [d]- und [l]-Zinklactat (2 aq.) sind leichter, [d]- und [l]-Calciumlactat (4 aq.) schwerer löslich als die entsprechenden racemischen Salze.

Oxybuttersäuren $C_3H_6(OH)COOH$:

α-Oxyisobuttersäure $(CH_3)_2C(OH)COOH$, Acetonsäure, 2-Methyl-2-Propanolsäure, Fp. 79°, Sdp. 212°, findet sich bei Acetonurie im Harn.

β-Oxycarbonsäuren.

Aethylenmilchsäure, $CH_2(OH)CH_2COOH$, Hydracrylsäure, 3-Propanolsäure; dicker, nicht kristallisierbarer Sirup; bildet beim Erhitzen für sich oder beim Erwärmen mit H_2SO_4 unter Wasserabspaltung Acrylsäure. Ihr Zinksalz (4 aq.) ist im Gegensatz zu den Zinksalzen der isomeren Milchsäuren in Alkohol löslich.

γ-, δ- und ε-Oxycarbonsäuren.

Die γ- und δ-Säuren sind sehr unbeständig; durch innere Anhydridbildung gehen sie in Lactone über; ε-Säuren neigen nicht mehr zur Lactonbildung.

Aldehydcarbonsäuren.

Glyoxylsäure CHO.COOH + aq., Glyoxalsäure, Aethanalsäure (Debus 1856); dicke, in

Wasser leicht lösliche Flüssigkeit, die über konz. H_2SO_4 rhombische Prismen liefert; mit Wasserdampf unzersetzt destillierbar; findet sich in vielen unreifen Früchten (besonders Stachelbeeren), verschwindet aber beim Reifen. Sie verhält sich wie ein Aldehyd gegen ammoniakalische Silbersalzlösung usw., geht durch Oxydation in Oxalsäure, durch Reduktion in Glycolsäure und Traubensäure über; beim Kochen mit Kalilauge gibt sie Glycolsäure und Oxalsäure. Ihre Salze enthalten alle Kristallwasser, das aber beim Trocknen zum Teil entweicht. Das Calciumsalz (2 aq.) ist schwer löslich.

Formylessigsäure $CHO.CH_2COOH \rightleftarrows CH(OH) = CHCOOH$; die Ester bezw. deren Natriumsalze spielen in der Synthese eine ähnliche Rolle wie der Acetessigester.

Ketoncarbonsäuren.

Brenztraubensäure $CH_3CO.COOH$, Pyruvinsäure, Acetylameisensäure, Propanonsäure, Fp. 3°, Sdp. (12 mm) 61°, löslich in Wasser, Alkohol und Aether; riecht nach Essigsäure und Fleischextrakt; siedet unter Atmosphärendruck bei ca. 170° unter teilweiser Zersetzung in Brenzweinsäure und CO_2; die gleiche Umwandlung findet beim Erhitzen mit HCl auf 100° statt. Durch verd. H_2SO_4 wird sie bei 150° in Aldehyd und CO_2 gespalten; H_2O_2 zersetzt sie in Essigsäure und CO_2; beim Kochen mit Barytwasser liefert sie Uvitinsäure und Uvinsäure; bei längerem Stehen polymerisiert sie sich, am besten bei Gegenwart von Salzsäure, die auch bei den Salzen der Brenztraubensäure Polymerisationen bewirkt. Sie reduziert ammoniakalische Silbersalzlösung und gibt Alkalibisulfatverbindungen.

Acetessigsäure $CH_3COCH_2COOH \rightleftarrows CH_3C(OH) = CHCOOH$, Acetylessigsäure, Acetonmonocarbonsäure, β-Ketobuttersäure, 3-Butanonsäure (1863 Geuther; Frankland und Duppa; 1877 Wislicenus); dicke, stark saure, mit Wasser mischbare Flüssigkeit; spaltet sich beim Erwärmen in Aceton und CO_2; salpetrige Säure führt sie in Isonitrosoaceton und CO_2 über. Das Na- und das Ca-Salz finden sich zuweilen im Harn; das Eisensalz, das beim Mischen von Acetessigsäurelösung mit Eisenchlorid entsteht, ist rotviolett gefärbt. Die Ester der Acetessigsäure spielen in der Synthese eine außerordentlich große Rolle (vgl. die Artikel „Ester“ und „Synthese“).

Laevulinsäure $CH_3COCH_2CH_2COOH$, β-Acetylpropionsäure, 4-Pentanonsäure; Fp. 32,5°, Sdp. 239° (unter geringer Zersetzung); leicht löslich in Wasser, Alkohol und Aether; entsteht aus Laevulose beim Kochen mit verdünnter Säure (leichter als aus Dextrose). Wird beim Textildruck verwendet.

Dicarbonsäuren.

Oxalsäure $\begin{array}{l}COOH\\ \mid\\ COOH\end{array}$, Kleesäure, Aethandisäure (Scheele 1776, Wiegleb 1778, Gay Lussac 1829).

Die freie Säure kristallisiert mit 2 aq. in monoklinen, verwitternden Prismen; Fp. 101°; sie löst sich leicht in Wasser, ziemlich leicht in Alkohol, schwer in Aether. Aus starker H_2SO_4 bezw. HNO_3 erhält man die wasserfreie Säure in Kristallen, Fp. 189°; sie sublimiert bei vorsichtigem Erhitzen bei 150°. Die Oxalsäure findet sich frei in Boletus-(Röhrenpilz-)Arten, in Form von Salzen in Oxalis-(Sauerklee-) und Rumex-(Ampher-)Arten, in Salicornia-(Salzkraut-)Arten, in der Rhabarberwurzel usw.; sie entsteht beim Schmelzen von Zellulose mit Aetzkali (Gay Lussac, Dale). Bei raschem Erhitzen zersetzt die Oxalsäure sich in Ameisensäure, CO_2, CO und H_2O; ihre Lösung liefert bei Einwirkung von Licht und Luftsauerstoff CO_2 und H_2O (auch H_2O_2); mit schmelzendem Alkali erhält man Carbonat und H_2; mit konz. H_2SO_4 zersetzt sie sich in CO_2, CO und H_2O; nascierender Wasserstoff liefert Glyoxylsäure; konz. HNO_3 oxydiert sie langsam, saures Permanganat sehr schnell zu CO_2 und H_2O (Maßanalyse); ebenso saures Persulfat bei Gegenwart von Silbersalzen; sie reduziert mehrwertige Ionen (z. B. $Hg^{\cdot\cdot}$), indem sie zu CO_2 oxydiert wird (nur bei Gegenwart von Eisensalz!).

Oxalate. Die sauren und die neutralen Alkalisalze der Oxalsäure sind in Wasser leicht löslich, alle anderen fast unlöslich. Dikaliumoxalat $C_2O_4K_2$ + aq.; Monokaliumoxalat C_2O_4HK, findet sich z. B. in Oxalis acetosella, Sauerklee, daher der Name „Kleesäure“. Das „Kleesalz“ des Handels ist ein Gemisch des sauren Kaliumsalzes mit dem übersauren Salz $C_2O_4HK.C_2O_4H_2$ + 2 aq. Diammoniumoxalat $C_2O_4(NH_4)_2$ + aq. bildet links- und rechtshemiëdrische Kristalle. Calciumoxalat C_2O_4Ca + aq. ist unlöslich in Essigsäure; dient zur Erkennung von $Ca^{\cdot\cdot}$ und von Oxalsäure. Silberoxalat $C_2O_4Ag_2$ explodiert bei raschem Erhitzen. Oxalsaures Antimonoxyd dient in der Färberei (ähnlich wie Brechweinstein) als Beize.

Malonsäure $CH_2(COOH)_2$, Propandisäure (Dessaignes 1858; Kolbe, H. Müller 1864); Fp. 132°; trikline Tafeln, in Wasser und Alkohol leicht löslich; findet sich als Ca-Salz in den Zuckerrüben, zerfällt beim Erhitzen über den Schmelzpunkt in Essigsäure und CO_2. Die Malonsäureester resp. ihre Natriumsalze haben große synthetische Bedeutung.

Methylmalonsäure $CH_3CH(COOH)_2$, Isobernsteinsäure, Aethylidenbernsteinsäure, Fp. 130° (unter Zersetzung); in Wasser leichter löslich als die isomere gewöhnliche Bernsteinsäure.

Gewöhnliche Bernsteinsäure $\begin{array}{l}CH_2COOH\\ \mid\\ CH_2COOH\end{array}$ Aethylenbernsteinsäure, Fp. 185°,

Sdp. 235° (unter Zersetzung in Anhydrid und Wasser); monokline Prismen oder Tafeln; ziemlich löslich in Wasser; hat einen schwach sauren, wenig angenehmen Geschmack. Sie findet sich im Bernstein, in einigen Braunkohlen, in Harzen, in Terpentinölarten, in gewissen tierischen Säften. Ihre wässerige Lösung zerfällt im Licht bei Gegenwart von Uransalzen in Propionsäure und CO_2.

Succinate. Calciumsuccinat $C_4H_4O_4Ca$ + 3 aq. aus kalter, + 1 aq. aus heißer Lösung. Das K-Salz liefert bei der Elektrolyse Aethylen und CO_2. Das unlösliche basische Ferrisalz ist analytisch (z. B. zur Trennung von Eisen und Aluminium) wichtig.

Brenzweinsäure $\begin{array}{l} CH_3\overset{*}{C}HCOOH \\ \quad | \\ CH_2COOH \end{array}$ Methylbernsteinsäure, Fp. 112°; leicht löslich in Wasser, Alkohol und Aether; zerfällt bei ca. 200° ins Anhydrid und Wasser; die wässerige Lösung liefert im Licht bei Gegenwart von Uransalz Buttersäure und CO_2. Die Brenzweinsäure enthält ein asymmetrisches C-Atom; die Spaltung gelingt mittels der Strychninsalze, die [d]-Säure entsteht auch durch Oxydation von Menthon.

Glutarsäure $CH_2\begin{array}{l} \diagup CH_2COOH \\ \diagdown CH_2COOH \end{array}$, normale Brenzweinsäure, Pentandisäure, Fp. 97°; große monokline Tafeln; leicht in Wasser löslich; destilliert bei ca. 303° fast ohne Zersetzung.

Adipinsäure $\begin{array}{l} CH_2CH_2COOH \\ | \\ CH_2CH_2COOH \end{array}$, Hexandisäure, Fp. 148°, Sdp. (10 mm) 205,5°; wurde zuerst bei der Oxydation von Fetten (adeps = Fett) mittels HNO_3 erhalten.

Isopropylbernsteinsäure $\begin{array}{l} (CH_3)_2CHCH\,COOH \\ \qquad\qquad | \\ \qquad\quad CH_2COOH \end{array}$

Pimelinsäure, Fp. 115°.

Normale Pimelinsäure $CH_2\begin{array}{l} \diagup CH_2CH_2COOH \\ \diagdown CH_2CH_2COOH \end{array}$ Heptandisäure, Fp. 105°, entsteht bei der Oxydation von Fetten mittels HNO_3 (πιμελή = Fett).

Korksäure $\begin{array}{l} CH_2CH_2CH_2COOH \\ | \\ CH_2CH_2CH_2COOH \end{array}$ Suberinsäure, Fp. 140°, entsteht beim Kochen von Kork (suber = Kork) mit HNO_3.

Lepargylsäure $(COOH)(CH_2)_7COOH$, Azelaïnsäure, Fp. 106°.

Sebacinsäure $(COOH)(CH_2)_8COOH$, Fp. 133°.

Brassylsäure $(COOH)(CH_2)_{11}COOH$, Fp. 114°.

Roccellsäure $(COOH)(CH_2)_{15}COOH$, Fp. 132°, findet sich frei in Roccella tinctoria (Lackmusflechte).

Fumarsäure $\begin{array}{l} HC.COOH \\ \quad \| \\ HOOC.CH \end{array}$; kleine weiße Nadeln, die gegen 200° sublimieren; ziemlich löslich in heißem Wasser, fast gar nicht in kaltem, schmeckt rein sauer; findet sich frei in vielen Pflanzen, z. B. im isländischen Moos, im Erdrauch (Fumaria officinalis), in einigen Pilzen, z. B. in Trüffeln. Sie entsteht aus Maleïnsäure durch Erhitzen auf 200° bezw. durch Einwirkung von Halogenwasserstoffsäuren; ihre Ester erhält man durch Einwirkung von Jod auf die Maleïnsäureester. Bei höherer Temperatur zerfällt sie teilweise in Maleïnsäureanhydrid und Wasser. Das Silbersalz ist ziemlich lichtbeständig; das Baryumsalz (3 aq.) verwittert leicht und gibt beim Kochen mit Wasser das fast unlösliche Anhydridsalz $C_4H_2O_4Ba$.

Maleïnsäure $\begin{array}{l} HC.COOH \\ \| \\ HC.COOH \end{array}$, Fp. 135°, Sdp. 160° (unter Bildung des Maleïnsäureanhydrids), stereoisomer mit Fumarsäure, große Prismen, leicht löslich in Wasser, von unangenehm saurem Geschmack; entsteht bei raschem Erhitzen der Aepfelsäure und aus Fumarsäure durch starkes Erhitzen, beim Behandeln mit PCl_5 u. a. Das Silbersalz bildet einen feinen, allmählich grobkristallinisch werdenden Niederschlag; das in heißem Wasser leicht lösliche Baryumsalz (1 aq.) kristallisiert gut.

Aehnlichkeiten von Fumar- und Maleïnsäure: Beide geben 1. bei der Elektrolyse ihrer Alkalisalze Acetylen; 2. mit nascierendem Wasserstoff Bernsteinsäure; 3. mit NaOH bei 100° inaktive Aepfelsäure.

Unterschiede zwischen Fumar- und Maleïnsäure:

Mit Brom gibt

Fumarsäure → Dibrombernsteinsäure

Maleïnsäureanhydrid → Isodibrombernsteinsäureanhydrid.

Mit $KMnO_4$ gibt

Fumarsäure → Traubensäure

Maleïnsäure → Mesoweinsäure.

Mesaconsäure $\begin{array}{l} H_3C.C.COOH \\ \qquad \| \\ HOOC.C.H \end{array}$, Methylfumarsäure, Fp. 202°, schwer löslich in Wasser, nicht flüchtig mit Wasserdampf; entsteht beim Erhitzen von Mesa- und Itaconsäure mit etwas Wasser auf 200°, aus Citraconsäurelösung (in Aether-Chloroform) im Sonnenlicht bei Gegenwart von etwas Brom.

Citraconsäure $\begin{array}{l} H_3C.C.COOH \\ \qquad \| \\ \quad HC.COOH \end{array}$ Methylmaleïnsäure, Fp. 91°, stereoisomer mit Mesaconsäure; leicht löslich in Wasser; gibt mit Wasserstoff Brenzweinsäure.

Itaconsäure $\begin{array}{l} H_2C{=}C{-}COOH \\ \qquad | \\ \quad CH_2.COOH \end{array}$, Fp. 161°, nicht flüchtig mit Wasserdampf, gibt mit Wasserstoff Brenzweinsäure.

Diolefindicarbonsäuren.

Muconsäure $\begin{array}{l} CH = CHCOOH \\ \mid \\ CH = CHCOOH \end{array}$ Fp. 292° (unter Zersetzung); die isomere noch nicht bekannte Dimethylenbernsteinsäure $\begin{array}{l} H_2C = C.COOH \\ \mid \\ H_2C = C.COOH \end{array}$ ist die Muttersubstanz der Fulgide.

Acetylen- und Polyacetylendicarbonsäuren.

Acetylendicarbonsäure $\begin{array}{l} C.COOH \\ \vert\vert\vert \\ C.COOH \end{array}$, Fp. 175° (unter Zersetzung); bildet ein verwitterndes Hydrat mit 2 aq., entsteht aus Dibrom- und Isodibrombernsteinsäure mittels alkoholischen Kaliumhydroxyds; gibt mit Halogenwasserstoff Halogenfumarsäure, mit Halogen Dihalogenfumarsäure. Das primäre K-Salz ist in Wasser schwer löslich; beim Erwärmen gibt es propiolsaures Kalium und CO_2; das Silbersalz zersetzt sich leicht unter Bildung von Acetylensilber und CO_2.

Diacetylendicarbonsäure $\begin{array}{l} C \equiv C.COOH \\ \mid \\ C \equiv C.COOH \end{array}$ + aq. wird am Licht schnell dunkelrot gefärbt und explodiert bei 177°.

Tetraacetylendicarbonsäure $\begin{array}{l} C \equiv C.C \equiv C.COOH \\ \mid \\ C \equiv C.C \equiv C.COOH \end{array}$ wird am Licht rasch schwarz und explodiert heftig beim Erhitzen.

Dioxymonocarbonsäuren.

Glycerinsäure $CH_2(OH)\overset{*}{C}H(OH)COOH$, Dioxypropionsäure, Propandiolsäure; sirupförmig, in Wasser, Alkohol und Aether leicht löslich; enthält ein asymmetrisches C-Atom; die Spaltung gelingt mittels der Brucinsalze; die linksdrehende Form kann durch Einwirkung von Penicillium glaucum, die rechtsdrehende Form durch Einwirkung des Bacillus ethaceticus auf die inaktive Säure isoliert werden. Beim Erhitzen auf 140° zersetzt sich die Glycerinsäure in Brenztraubensäure, Brenzweinsäure und Wasser; beim Kochen mit Alkali gibt sie Oxalsäure und Milchsäure, beim Schmelzen mit Alkali Essigsäure und Ameisensäure. Das Calciumsalz (2 aq) ist in Wasser leicht löslich; das Bleisalz ist in kaltem Wasser schwer löslich.

Glycidsäure $O\begin{array}{l} \diagup CHCOOH \\ \quad \mid \\ \diagdown CH_2 \end{array}$, isomer mit Brenztraubensäure, bewegliche, mit Wasser, Alkohol und Aether mischbare Flüssigkeit von sehr stechendem Geruch.

Dioxystearinsäure $C_{18}H_{34}(OH)_2O_2$ entsteht durch vorsichtige Oxydation der Oelsäure.

Oxyaldocarbonsäuren und Oxyketoncarbonsäuren.

Formyloxyessigsäure $CHO.CH(OH)COOH \rightleftarrows CH_2(OH)COCOOH$(?) Oxybrenztraubensäure, entsteht aus Nitrozellulose mittels Natriumhydroxyd.

Monooxydicarbonsäuren.

Tartronsäure $CH(OH)(COOH)_2$, Oxymalonsäure, Propanoldisäure, Fp. 184° (unter Zersetzung), leicht in Wasser und in Alkohol, schwer in Aether löslich; entsteht durch freiwillige Spaltung von Nitroweinsäure (Dessaignes 1854) und Dioxyweinsäure.

Aepfelsäure $\begin{array}{l} \overset{*}{C}H(OH)COOH \\ \mid \\ CH_2COOH \end{array}$, Oxyaethylenbernsteinsäure, Butanoldisäure, Acidum malicum, enthält ein asymmetrisches C-Atom.

[d + l]-Aepfelsäure, inaktive Aepfelsäure entsteht u. a. aus Fumarsäure durch Erhitzen mit Wasser auf 200°, aus Fumar- oder Maleïnsäure durch Erhitzen mit Natriumhydroxyd auf 100°. Ihre Spaltung gelingt mittels der Cinchoninsalze. Das Monoammoniummalat (1 aq.) kristallisiert gut.

l-Aepfelsäure, Links-Aepfelsäure, gewöhnliche Aepfelsäure (Scheele 1785) findet sich frei in vielen Pflanzensäften, z. B. in unreifen Aepfeln, Weintrauben, Stachelbeeren, Quitten, ferner in den Vogelbeeren von Sorbus aucuparia, in den Beeren von Berberis vulgaris (Berberitze, Sauerdorn), von Hippophaë rhamnoides (Sanddorn) usw. Ihre Zusammensetzung ermittelte Liebig 1832. Fp. ca. 100°; zerfließliche, zu Drusen vereinigte Nadeln; leicht in Wasser und in Alkohol, schwer in Aether löslich. Sie kann u. a. durch Einwirkung von salpetriger Säure auf l-Asparagin erhalten werden. Das neutrale Calciumsalz (1 aq.) ist in Wasser schwer löslich, das saure Calciumsalz (6 aq.) löst sich in warmem Wasser ziemlich leicht.

d-Aepfelsäure, Rechts-Aepfelsäure, entsteht u. a. durch Reduktion der Rechtsweinsäure mit HJ, durch Einwirkung von salpetriger Säure auf d-Asparagin.

Ueber eine weitere d-Säure aus Crassulaceen, die für die Stereochemie von Wichtigkeit ist, vgl. die Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft **31**, 1432, 1898.

Die Aepfelsäuren geben beim Erhitzen auf 150° Fumarsäure, beim raschen Erhitzen auf 180° Fumarsäure, Maleïnsäureanhydrid und Wasser; mit HBr entsteht Brombernsteinsäure; beim Erhitzen mit konz. H_2SO_4 liefern sie Cumalinsäure; bei der Oxydation (mittels $KMnO_4$ oder H_2O_2 + Ferrosalz) liefern sie Oxalessigsäure; bei der Reduktion geben sie Bernsteinsäure; beim Erhitzen mit Phenolen und Schwefelsäure werden Cumarine gebildet. Die Calciumsalze vergären durch Hefe, die freien Säuren durch den Bacillus aërogenes unter Bildung von Bernsteinsäure.

Ketondicarbonsäuren.

Mesoxalsäure $CO(COOH)_2 + aq. \rightleftarrows C(OH)_2(COOH)_2$, Dioxymalonsäure, Propandiolsäure; zerfließliche Prismen, verhält sich wie ein Keton; spaltet sich beim Erhitzen in Glyoxylsäure und CO_2; in wässeriger Lösung gibt sie beim Eindampfen Oxalsäure und CO. Das Calcium- und das Baryumsalz sind schwer löslich.

Oxymaleïnsäure
HO.C.COOH ‖ H.C.COOH ⇄ CO.COOH | CH_2.COOH
Oxalessigsäure, Oxobernsteinsäure, Fp. 152°, gibt beim Behandeln mit starker Schwefelsäure die stereoisomere Oxyfumarsäure
HO.C.COOH ‖ HOOC.C.H

Acetondicarbonsäure
$C{=}O(CH_2COOH)_2 \rightleftarrows$ CHCOOH ‖ C—(OH) \ CH_2COOH,
β-Ketoglutarsäure, Fp. ca. 130° (unter Zerfall in Aceton und CO_2); leicht löslich in Wasser und in Aether; zersetzt sich beim Kochen mit Wasser in Aceton und CO_2; nascierender Wasserstoff liefert β-Oxyglutarsäure.

Acetondiessigsäure $C{=}O(CH_2CHCOOH)_2$,
Hydrochelidonsäure, Fp. 143°.

Tricarbonsäuren.

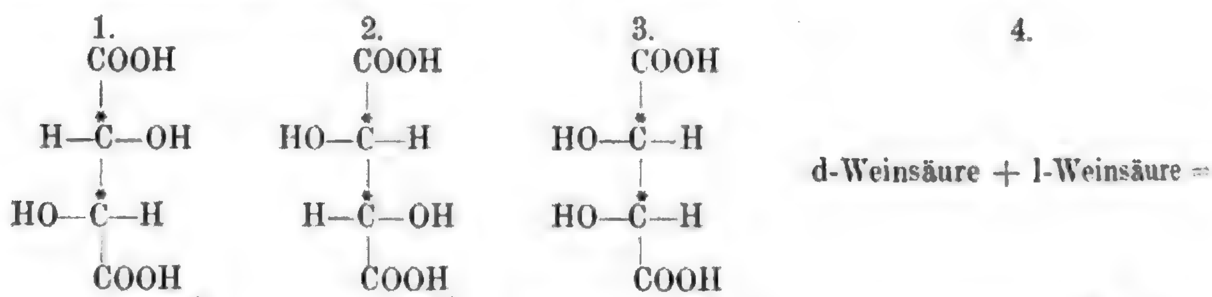
Tricarballylsäure $CH_2(COOH).CH(COOH).CH_2(COOH)$, Fp. 162°; in Wasser leicht lösliche Prismen; findet sich in der Runkelrübe; sie entsteht u. a. durch Reduktion der Citronensäure und der Aconitsäure.

Aconitsäure $CH_2(COOH).C(COOH){=}CH(COOH)$, Fp. 191° (unter Zersetzung); leicht löslich in Wasser; findet sich im Eisenhut (Aconitum Napellus), im Schachtelhalm (Equisetum fluviatile), im Zuckerrohr, in der Runkelrübe u. a.; sie entsteht u. a. aus der Citronensäure beim raschen Erhitzen. Das Calciumsalz (6 aq.) ist schwer löslich. Die Aconitsäure gibt bei starkem Erhitzen erst ihr Anhydrid, dann Itacon- und Citraconsäureanhydrid.

Dioxydicarbonsäuren.

Weinsäuren $\overset{*}{C}H(OH)COOH$ | $\overset{*}{C}H(OH)COOH$, Dioxyaethylenbernsteinsäuren, Butandioldisäuren.

Die Weinsäure enthält 2 asymmetrische C-Atome; sie kann daher in 4 Formen auftreten (van't Hoff und Le Bel (1874); vgl. dazu die Artikel „Isomerie" und „Drehung der Polarisationsebene"):



1. d-Weinsäure (d/d) 2. l-Weinsäure (l/l) 3. Mesoweinsäure (l/d) 4. d-Weinsäure + l-Weinsäure = Traubensäure (d/d + l/l)

[d + l]-Weinsäure, $C_2H_2(OH)_2(COOH)_2$ + aq., Acidum racemicum, racemische Weinsäure, Traubensäure, Paraweinsäure (Kestner 1822); optisch inaktiv; wurde von Gay Lussac und von Berzelius 1829 als isomer mit der gewöhnlichen d-Weinsäure erkannt; rhombische Prismen, schwer löslich in Wasser; verwittert an der Luft; die wasserfreie Säure schmilzt bei 206° unter Zersetzung; findet sich bisweilen im Traubensaft. Sie entsteht beim Mischen konzentrierter äquimolekularer Lösungen von d- und l-Säure, durch Erhitzen von d-Säure mit Wasser auf 175° neben Mesoweinsäure; durch Oxydation von Fumarsäure mittels $KMnO_4$, von Mannit, Dulcit, Schleimsäure u. a. mittels HNO_3, aus dibrombernsteinsaurem Silber durch Kochen mit Wasser neben Mesoweinsäure usw. Technisch wird sie aus der Weinstein-Mutterlauge gewonnen. Die wässerigen Lösungen reduzieren ammoniakalische Silbersalzlösungen.

Racemate. Die Salze der racemischen Weinsäure sind denen der aktiven Säuren ähnlich, haben aber keine hemiëdrischen Flächen. Monokaliumracemat ist leichter löslich als das entsprechende Salz der d-Säure, der sogenannte Weinstein. Das Ca-Salz (4 aq.) ist schwerer löslich als die Ca-Salze der drei anderen Weinsäuren.

Spaltung der Traubensäure (Pasteur 1848 bis 1853). 1. Aus einer Lösung des Natriumammoniumracemates (aq.) scheiden sich unterhalb 28° rhombische Kristalle mit rechts- und linkshemiëdrischen Flächen aus, welche der Rechts- bezw. Linksweinsäure angehören und durch Auslesen getrennt werden können. 2. Mittels der

Cinchoninsalze ist die Spaltung infolge der geringeren Löslichkeit des linksweinsauren Cinchonins, mittels der Chininsalze infolge der geringeren Löslichkeit des rechtsweinsauren Chinins durchzuführen. 3. Penicillium glaucum zerstört die Rechtsweinsäure in Traubensäurelösungen.

d-Weinsäure, Rechtsweinsäure, gewöhnliche Weinsäure, Acidum tartaricum (Scheele 1769); Fp. 167 bis 170°; große monokline hemiëdrische Prismen, leicht löslich in Wasser und in Alkohol, fast unlöslich in Aether; die Kristalle und die Lösungen sind rechtsdrehend (Biot 1838), sehr konzentrierte wässerige Lösungen drehen bei tiefen Temperaturen links; findet sich frei oder in Form von Salzen, besonders als saures K-Salz (Weinstein, Tartarus), im Pflanzenreich, namentlich im Traubensaft, bei dessen Gärung der Weinstein sich kristallinisch abscheidet; dieser wird technisch auf freie Säure verarbeitet, indem er durch Kochen mit $CaCO_3$ und $CaCl_2$ in das neutrale Ca-Salz übergeführt wird, aus dem H_2SO_4 die Säure in Freiheit setzt. Die d-Säure entsteht durch Oxydation von Milchzucker, Methyltetrose und d-Zuckersäure mittels HNO_3. Beim Schmelzen gibt sie das Anhydrid; beim stärkeren Erhitzen entstehen Brenztrauben- und Brenzweinsäure, die an ihrem charakteristischen Geruch zu erkennen sind; beim Erhitzen mit Wasser auf 165° liefert sie vornehmlich Mesoweinsäure, auf 175° hauptsächlich Traubensäure; bei gemäßigter Oxydation entstehen Dioxymaleïn-, Dioxywein- und Tartronsäure; bei energischer Oxydation Ameisensäure und CO_2; bei der Reduktion mit HJ entstehen d-Aepfelsäure und Aethylenbernsteinsäure.

Tartrate. Neutrales K-Salz (½ aq.) ist in Wasser leicht löslich; das saure K-Salz (ohne aq.), das in Wasser schwer löslich ist, wird aus Lösungen des neutralen Salzes durch Säuren gefällt; es bildet den natürlichen Weinstein (Tartarus, Cremor tartari). Das K-Na-Salz (4 aq.), das sogenannte Seignettesalz, kristallisiert in rhombischen hemiëdrischen Säulen; ähnlich ist das K-NH_4-Salz (4 aq.). Das Ca-Salz (1 aq.) ist in Wasser schwer löslich und fällt aus neutralen Lösungen der anderen Salze auf Zusatz von $CaCl_2$ aus; es löst sich in Säuren und Alkalien; aus der alkalischen Lösung scheidet es sich beim Kochen als Gallerte wieder ab. — Eine Auflösung von Seignettesalz, Kupfersulfat und Natriumhydroxyd bildet die zum Nachweis und zur Titration von Glucosen verwendete Fehlingsche Lösung; Kupfersalze werden in Gegenwart von Weinsäure durch Alkalien nicht gefällt infolge Bildung komplexer Kupferweinsäureverbindungen (vgl. „Kupfer" im Artikel „Lithiumgruppe"). — Eine komplexe Verbindung ist auch der sogenannte Brechweinstein, Tartarus emeticus oder stibiatus, das weinsaure Antimonylkalium, $C_4H_4O_6$-(SbO)K + ½ aq.; er entsteht beim Kochen einer wässerigen Weinsteinlösung mit Sb_2O_3; rhombische verwitternde Oktaëder; löslich in Wasser; die metallisch schmeckende giftige Lösung bewirkt Erbrechen; auch eine entsprechende Arsenverbindung ist bekannt.

Verwendung. Die freie Säure und ihre Salze werden in der analytischen Chemie, in der Medizin (für Brausepulver usw.) und in der Färberei (für Beizen) verwendet.

l-Weinsäure, Linksweinsäure (Pasteur), ist der d-Säure völlig ähnlich, von der sie sich nur durch die Linksdrehung der Polarisationsebene und durch die Linkshemiëdrie der Kristalle unterscheidet, das gleiche gilt für ihre Salze usw.

i-Weinsäure, inaktive Weinsäure, Mesoweinsäure, Antiweinsäure (Pasteur), verwitternde rechtwinkelige Tafeln (1 aq.); Fp. (wasserfrei) 143°; optisch inaktiv infolge „intramolekularen Ausgleichs"; entsteht durch Oxydation aus Maleïnsäure mittels $KMnO_4$, aus Sorbin und i-Erythrit mittels HNO_3; ferner durch Erhitzen der d-Säure mit etwas Wasser auf 165° (neben Traubensäure) u. a. Das saure K-Salz ist leicht löslich in Wasser.

Diketondicarbonsäuren.

Dioxyweinsäure $\begin{array}{l}CO.COOH\\|\\CO.COOH\end{array} \rightleftarrows \begin{array}{l}C(OH)_2COOH\\|\\C(OH)_2COOH\end{array}$ (?)

Fp. 98° (unter Zersetzung), entsteht durch Oxydation von Dioxymaleinsäure.

Oxaldiessigsäure

$$\begin{array}{l}CO.CH_2COOH\\|\\CO.CH_2COOH\end{array} \rightleftarrows \begin{array}{l}C(OH)=CH_2COOH\\|\\C(OH)=CH_2COOH\end{array},$$

Ketipinsäure.

Oxytricarbonsäuren.

Citronensäure $\begin{array}{l}CH_2COOH\\|\\C(OH)COOH\\|\\CH_2COOH\end{array}$

Oxytricarballylsäure, Acidum citricum; große rhombische Prismen (1 aq.), Fp. (wasserfrei) 153°; sehr leicht in Wasser, leicht in Alkohol, sehr schwer in Aether löslich; findet sich frei in den Citronen, Orangen, Johannisbeeren, Preisselbeeren, Stachelbeeren (neben Aepfelsäure) usw., als Ca-Salz in Runkelrüben, im Waid u. a.; technisch gewinnt man sie aus dem Citronensaft oder durch Gärung der Glucose mittels der Schimmelpilze

Citromycetes pfefferianus und glaber. Die Citronensäure liefert bei 175° Aconitsäure, ferner unter CO- und H_2O-Abspaltung Acetondicarbonsäure, die in Aceton und CO_2 zerfällt. Durch schmelzendes Alkali und durch HNO_3 wird sie zu Essigsäure und Oxalsäure zersetzt; warme konz. H_2SO_4 und ebenso $KMnO_4$ führen sie in Acetondicarbonsäure über.

Citrate. Die Alkalisalze sind wasserlöslich; die übrigen meist unlöslich. Wässerige Citronensäurelösung wird nicht durch $CaCl_2$ gefällt; erst beim Kochen scheidet sich das tertiäre Salz (+ 4 aq.) ab.

Polyoxymonocarbonsäuren.[1])

Stereoisomere Säuren $(HO)H_2C[CHOH]_3COOH$; Tetraoxy-n-valeriansäuren, Pentonsäuren. Zu diesen gehören die Arabon-, Ribon-, Xylon-, Lyxon-, Apion-, Rhamnon- und Saccharinsäuren.

Stereoisomere Säuren $(HO)H_2C[CHOH]_4COOH$; Pentaoxy-n-Capronsäuren, Hexonsäuren:

Mannonsäuren; d-, l-, und [d + l]-Säure sind sirupartige Flüssigkeiten, die leicht Lactone bilden, bei der Oxydation die entsprechenden stereoisomeren Mannozuckersäuren liefern, und beim Erhitzen mit Chinolin auf 140° teilweise in die entsprechenden Gluconsäuren übergehen.

Gluconsäuren, d-, l- und [d + l]-Säure sind sirupartige Flüssigkeiten; sie bilden leicht Lactone, gehen durch Reduktion in die entsprechenden Glucosen, durch Oxydation in die entsprechenden Zuckersäuren und beim Erhitzen mit Chinolin auf 140° teilweise in die entsprechenden Mannonsäuren über.

d-Gluconsäure, Dextronsäure, Maltonsäure, entsteht durch Oxydation von d-Glucose und anderen Kohlehydraten mittels Chlor- oder Bromwasser.

Hierher gehören ferner die Gulonsäuren, Galactonsäuren, Talonsäuren und Idonsäuren.

Oxyaldehydo- und Oxypolycarbonsäuren.

d-Glucuronsäure $CHO.[CHOH]_4COOH$ findet sich im Harn in Form von Glucosiden mit Chloral, Phenol, Kampher u. a. nach Einführung dieser Stoffe in den Organismus.

Stereoisomere Säuren $HOOC[CHOH]_4COOH$, Tetraoxydicarbonsäuren:

Mannozuckersäuren, d-, l- und [d + l]-Säure entstehen durch Oxydation der entsprechenden Mannonsäuren; bilden Dilactone; stereoisomer mit diesen Säuren sind die

Zuckersäuren: die gewöhnliche Zuckersäure ist die l-Zuckersäure, zerfließlich, leicht löslich in Alkohol; entsteht durch Oxydation aus Rohzucker, d-Glucose u. a. mittels HNO_3, aus Glucuronsäure mittels Bromwasser; gibt bei der Oxydation d-Weinsäure und Oxalsäure, bei der Reduktion mittels Natriumamalgam d-Glucuronsäure, mittels HJ n-Adipinsäure. Stereoisomer mit den eben besprochenen Säuren ist ferner die

Schleimsäure, Fp. 210° (unter Zersetzung); in kaltem Wasser und in Alkohol fast unlöslich; optisch inaktiv infolge intramolekularen Ausgleichs; entsteht durch Oxydation von Dulcit, Milchzucker u. a.; gibt beim Kochen mit Wasser eine Lactonsäure, die bei der Reduktion [d + l]-Galactonsäure liefert.

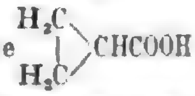
Hierher gehören ferner die Idozuckersäuren, die Isozuckersäure, die Allo- und die Taloschleimsäuren.

Tricarbonsäuren

Desoxalsäure $HOOC.CH(OH)C(OH)(COOH)_2$, zerfließliche Masse.

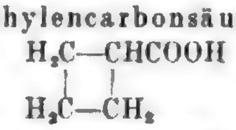
Carbonsäuren carbocyklischer (isocyklischer) Verbindungen.[1])

Carbonsäuren tri-, tetra-, penta- und heptacarbocyklischer Verbindungen.

Trimethylencarbonsäure 

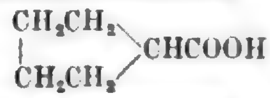
Fp. 18°, Sdp. 183°; gibt mit Brom α,γ-Dibrombuttersäure.

Tetramethylencarbonsäure



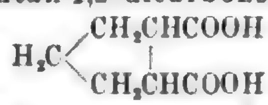
Sdp. 194°, riecht fettsäureartig; gibt mit HJ n-Valeriansäure.

Cyclopentancarbonsäure



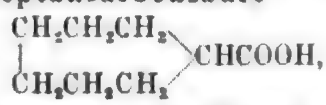
Sdp. 214°, hat unangenehmen schweißartigen Geruch.

Cyclopentan-1,2-dicarbonsäure



kommt in zwei stereoisomeren Formen vor.

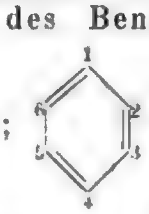
Cycloheptancarbonsäure



Suberancarbonsäure, Sdp. (15 mm) 139°.

Carbonsäuren der hexacarbocyklischen Verbindungen.

Aromatische Carbonsäuren.[2])

Säuren des Benzols und seiner Homologen;  :

Benzoësäure C_6H_5COOH. Phenylameisensäure, Fp. 120°, Sdp. 250°; weiße glänzende Blättchen, leicht löslich in heißem Wasser; sublimiert leicht und ist mit Wasserdämpfen flüchtig; Benzoesäuredampf hat einen

[1]) Ueber die Struktur dieser Säuren s. auch den Artikel „Kohlehydrate".

[1]) Vgl. dazu den Artikel „Isocyklische Systeme".

[2]) Vgl. dazu die Artikel „Benzolreihe" u. a.

eigentümlichen, die Schleimhäute stark reizenden Geruch. Die Säure zerfällt beim Erhitzen mit Kalk in Benzol und CO_2; durch Reduktion geht sie in Tetra- und Hexahydrobenzoësäure über. Sie entsteht durch Oxydation von allen Benzolderivaten, in denen ein Wasserstoff des Benzols ersetzt ist, durch eine einwertige mittels eines C-Atoms an den Ring gebundene Seitenkette. Technisch gewinnt man sie u. a. auch aus dem Benzoëharz (von Styrax Benzoïn, einer Baumart der Sundainseln) durch Sublimation (17. Jahrhundert), oder durch Behandeln mit Kalkmilch (Scheele 1775). Ihre Zusammensetzung ermittelten Liebig und Wöhler (1832); Mitscherlich (1834) wies ihren Zusammenhang mit dem Benzol nach.

Salze. Die Benzoate sind meist in Wasser leicht löslich; das Ag-Salz kristallisiert aus heißem Wasser in glänzenden Blättchen, die in Alkohol sehr wenig löslich sind.

Toluylsäuren $C_6H_4(CH_3)COOH$; o-Säure Fp. 102; m-Säure Fp. 110°, Sdp. 263°; p-Säure Fp. 186°, Sdp. 275°.

Mesitylensäure $C_6H_3(\overset{1.3}{CH_3})_2\overset{5}{C}OOH$, Fp. 166°, entsteht aus Mesitylen durch Oxydation mittels verdünnter HNO_3; bei stärkerer Oxydation entstehen Uvitin- und Trimesinsäure.

Cuminsäure $C_6H_4(\overset{1}{C_3H_7})\overset{4}{C}OOH$, p-Isopropylbenzoësäure, Fp. 117°, entsteht durch Oxydation von Cuminol.

Phenylessigsäure $C_6H_5CH_2COOH$, Alphatoluylsäure, Fp. 76°, Sdp. 262; tritt bei der Fäulnis von Albuminaten auf.

Hydrozimmtsäure $C_6H_5CH_2CH_2COOH$ β-Phenylpropionsäure, Fp. 47°, Sdp. 280°; entsteht durch Reduktion der Zimmtsäure.

Hydratropasäure $C_6H_5CH(CH_3)COOH$, α-Phenylpropionsäure, Sdp. 265°; entsteht durch Reduktion der Atropasäure.

Phenylacrylsäuren:

Zimmtsäure $C_6H_5CH{=}CHCOOH$, β-Phenylacrylsäure; kommt in zwei stereoisomeren Formen vor (vgl. Fumar- und Maleïnsäure). Gewöhnliche Zimmtsäure, Acidum cinnamylicum, Fp. 133°, Sdp. 300°, ist die fumaroïde Form; feine Nadeln aus heißem Wasser, Prismen aus Alkohol; findet sich im Peru- und Tolubalsam (von Myroxylonarten [mittelamerikanischen Bäumen]), im Storax (Harz der Liquidamberarten [südamerikanischer Bäume] und einzelner Styraxarten [orientalischer Bäume]), in Benzoëharzen u. a. Geht beim Belichten in festem Zustand in die polymere α-Truxillsäure $(C_6H_5C_2H_2COOH)_2$ über.

Allozimmtsäure, ist die malenoïde Form; trimorph; Fp. der drei Modifikationen: 42° [Erlenmeyers Isozimmtsäure], 58° [Liebermanns Isozimmtsäure] und 68° [Liebermanns Allozimmtsäure]; entsteht u. a. durch Einwirkung von ultraviolettem Licht auf Lösungen von gewöhnlicher Zimmtsäure.

Atropasäure $C_6H_5C\begin{matrix}\diagup COOH\\ \diagdown\!\!\diagdown CH_2\end{matrix}$, α-Phenylacrylsäure, Fp. 106°; schwer löslich in kaltem Wasser, leicht in Aether.

Oxyphenylolefincarbonsäuren.

o-Oxyzimmtsäure $C_6H_4(OH)CH{=}CH\,COOH$, o-Cumarsäure, Fp. 208°; leicht löslich in heißem Wasser und in Alkohol; findet sich im Steinklee (Melilotus officinalis) und in den Fahamblättern von Angrecum fragans (afrikanische Orchidee).

Kaffeesäure $(\overset{2.3}{OH})_2C_6H_3\overset{1}{C}H{=}CHCOOH$, Fp. 213° findet sich im Schierling (Cicuta virosa).

Ferulasäure $(\overset{4}{OH})(\overset{3}{CH_3O})C_6H_3\overset{1}{C}H{=}CH\,COOH$, Fp. 169°; findet sich im Harz Asa foetida (aus dem persischen Steckenkraut, Ferula asa foetida).

Umbellsäure $(\overset{2.4}{OH})_2C_6H_3\overset{1}{C}H{=}CHCOOH$ (s. Umbelliferon im Artikel „Anhydride").

Phenylacetylencarbonsäuren.

Phenylpropiolsäure $C_6H_5C{\equiv}CCOOH$, Fp. 136°; entsteht aus Dibromzimmtsäure und alkoholischem KOH beim Kochen.

Aromatische Oxycarbonsäuren.

Monooxybenzoesäuren:

Salicylsäure $C_6H_4(\overset{2}{OH})\overset{1}{C}OOH$, o-Oxybenzoësäure, Fp. 155° (Piria 1838); lange Nadeln aus heißem Wasser, Prismen aus Alkohol; löst sich bei 15° in 400 Teilen Wasser, leicht löslich in Chloroform; gibt beim Erhitzen Salol (Salicylsäurephenylester) und Xanthon; sie hat stark antiseptische Eigenschaften und wird als Medikament (z. B. gegen Rheumatismus) verwendet. Sie findet sich frei in den Blüten von Spiraea ulmaria (Sumpf-Spirstaude), als Methylester im Wintergrünöl (aus Gaultheria procumbens; nordamerikanische Ericacee; Cahours 1843), sowie in vielen anderen ätherischen Oelen. Technisch gewinnt man sie durch Erhitzen von Phenolnatrium im CO_2-Strom auf 200°, wobei die halbe Menge des Ausgangsproduktes in Dinatriumsalicylat übergeht (Kolbe 1860, 1874) oder durch Einwirkung von CO_2 auf Phenolnatrium bei 120 bis 140° im Autoklaven, wobei das ganze Ausgangsprodukt in Salicylsäure (zunächst in Phenolnatrium-o-carbonsäure $C_6H_4(ONa)COOH$) umgewandelt wird (R. Schmitt).

m-Oxybenzoesäure $C_6H_4(\overset{3}{OH})\overset{1}{C}OOH$, Fp. 200°.

p-Oxybenzoesäure $C_6H_4(\overset{4}{OH})\overset{1}{C}OOH$, Fp. (wasserfrei) 210° (unter Zersetzung).

Anissäure $C_6H_4(\overset{4}{OCH_3})\overset{1}{C}OOH$, Fp. 185°, Sdp. 280°; ist eine der am längsten bekannten aromatischen Säuren; entsteht durch Oxydation von gewissen ätherischen Oelen, besonders von

Anethol, dem Hauptbestandteil des Anisöls. (Cahours 1839). Ihre Konstitution klärte Kolbe auf.

Oxytolylsäuren $C_6H_3(CH_3)(OH)COOH$, Kresotinsäuren; 10 Isomere.

Oxyphenylessigsäuren $C_6H_4(OH)CH_2COOH$; o-, p-, m-; Fp. 144°, 129°, 148°.

Hydrocumarsäuren $C_6H_4(OH)CH_2CH_2COOH$, β-Phenolpropionsäuren; o- (Melilotsäure), m-, p-; Fp. 81°, 111°, 128°.

Dioxybenzoesäuren:

Protocatechusäure $C_6H_3(\overset{3.4}{OH})_2\overset{1}{COOH}$+aq., 3-4-Dioxybenzoësäure; Fp. (wasserfrei) 199° (unter Zersetzung); gelbe Nadeln; findet sich in den Früchten von Illicium religiosum (dem ostasiatischen Sternanisbaum; entsteht beim Schmelzen verschiedener Harze, wie Benzoë, Myrrha (aus Balsamodendron myrrha, dem arabischen Myrrhenbaum), Asa foetida Kino (s. Ferulasäure, Kinogerbsäure) mit Alkali; reduziert ammoniakalische Silbersalzlösung.

Veratrumsäure $C_6H_3(\overset{3.4}{OCH_3})\overset{1}{COOH}$ findet sich im Samen von Veratrum Sabadilla (einer Colchicacaea-[Giftlilien-]Art.

Orsellinsäure $C_6H_2(\overset{2}{CH_3})(\overset{4.6}{OH})_2\overset{1}{COOH}$, Fp. 176° (unter Zersetzung), ist die Muttersubstanz der Orsellsäure $C_{16}H_{14}O_7$, die sich in verschiedenen Flechten wie Roccella und Lecanora findet, sowie der Erythrinsäure (Erythrin) $C_{20}H_{22}O_{10}$ + 1½ aq, die aus der Flechte Roccella fuciformis mit Kalkmilch ausgezogen und auf Orseillefarbstoff verarbeitet wird.

Gallussäure $C_6H_2(\overset{3.4.5}{OH})_3\overset{1}{COOH}$+aq., Fp. ca. 220° (unter Zersetzung); seidenglänzende Nadeln; schwer löslich in kaltem Wasser, leicht in heißem Wasser, Alkohol, Aether; hat schwach säuerlichen, adstringierenden Geschmack; findet sich frei im Tee, in den Früchten von Caesalpinia coriaria (Divi-divi, vom Brasilienholzbaum), in den Granatwurzeln (von Punica granatum) usw.; sie entsteht aus Tannin (gewöhnliche Gerbsäure) durch Kochen mit verdünnter Säure; sie reduziert Gold- und Silbersalze (Photographie), gibt mit Ferrisalzen einen blauschwarzen Niederschlag; die Alkalisalze absorbieren unter Braunfärbung Sauerstoff. Das basische Wismutsalz $C_6H_2(OH)_3COO.Bi(OH)_2$ findet als Trockenantiseptikum „Dermatol" Verwendung; ein Jodid dieses Salzes $C_6H_2(OH)_3COO.Bi(OH)J$, das „Airol", dient als Ersatz für Jodoform.

Gerbsäuren (vgl. den Artikel „Pflanzenstoffe unbekannter Konstitution" und „Gerbung und Gerbstoffe"):

Digallussäure $C_6H_2(OH)_3CO.OC_6H_2(OH)_2COOH$ + 2 aq., Fp. (wasserfrei) 268 bis 270° (unter Zersetzung); und ihr Reduktionsprodukt, das (optisch aktive)

Leukotannin $C_6H_3(OH)_3CH(OH)OC_6H_2(OH)_2COOH$ bilden (wahrscheinlich) die Hauptbestandteile der Gallusgerbsäure oder des Tannins. Die reine Gallusgerbsäure stellt ein glänzendes amorphes Pulver dar; ist leicht in Wasser, schwer in Alkohol und in Aether löslich; sie findet sich in großer Menge in den Galläpfeln, die durch Insektenstich auf Eichenblättern (Quercus infectoria) entstehen, ferner im Sumachbaum (Rhus coriaria), im Tee u. a. Man gewinnt sie durch Behandeln der zerkleinerten Galläpfel mittels eines wässerigen Alkohol-Aethergemisches; die Wasserschicht enthält hauptsächlich Tannin. Die Lösungen sind optisch aktiv, und zwar rechtsdrehend. Das Tannin wird aus wässeriger Lösung durch Kochsalz abgeschieden, durch Leim gefällt; mit $FeCl_3$ gibt es eine dunkelblaue Färbung (Tinte); es besitzt stark gerbende Eigenschaften. Durch verdünnte Säuren oder Alkalien wird es in Gallussäure übergeführt. — Hierher gehören ferner die

Kinogerbsäure aus Pterocarpus Marsupium (Mimosenart) und Coccoloba unifera (Polygonea-Art), deren eingetrockneter Saft den Kino (Kinoharz) darstellt.

Catechugerbsäure aus Mimosa Catechu, deren Extrakt den Catechu bildet.

Moringagerbsäure (Maclurin) aus Morus tinctoria (Gelbholz-, Färber-Maulbeerbaum), in dem auch das Morin enthalten ist.

Kaffeegerbsäure aus Kaffeebohnen und Paraguaytee.

Eichengerbsäure aus Eichenrinde, in der sie neben Gallussäure, Ellagsäure und Quercit enthalten ist.

Chinagerbsäure aus Chinarinde (vom Fieberrindenbaum Cinchona officinalis), in der sie mit Chinaalkaloiden verbunden enthalten ist.

Alkoholcarbonsäuren.

o-Oxymethylbenzoesäure $C_6H_4(\overset{2}{CH_2OH})\overset{1}{COOH}$, Fp. 120° unter Bildung des inneren Anhydrides Phtalid.

Mekoninsäure, vgl. den Artikel „Anhydride" bei Phtalid.

Aldehydcarbonsäuren.

o-Phtalaldehydsäure $C_6H_4\begin{matrix}(2)CHO\\(1)COOH\end{matrix}$ Fp. 97°.

Opiansäure $(\overset{5.6}{CH_3O})_2C_6H_2\begin{matrix}(2)CHO\\(1)COOH\end{matrix}$ Fp. 150°, entsteht durch Oxydation von Narcotin (Wöhler und Liebig 1842), gibt durch Reduktion Mekonin (vgl. den Artikel „Anhydride").

Ketoncarbonsäuren.

o-Acetophenoncarbonsäure $C_6H_4\begin{matrix}(2)COCH_3\\(1)COOH\end{matrix}$, Fp. 115°, schmeckt süß.

Dicarbonsäuren.

Phtalsäuren:

o-Phtalsäure $C_6H_4\begin{matrix}(1)COOH\\(2)COOH\end{matrix}$, Benzol-o-dicarbonsäure, Fp. (bei raschem Erhitzen)

213°, unter Bildung des Anhydrids; entsteht durch Oxydation von Naphtalin bezw. substituierten Naphtalinen (Laurent 1836, „Naphtalinsäure"), von o-Xylol, o-Toluylsäure u. a. mit HNO_3, $KMnO_4$ usw. Durch verdünnte Chromsäure wird sie zu CO_2 verbrannt; beim Erhitzen mit KOH gibt sie Benzol und CO_2; beim Erhitzen des Ca-Salzes mit 1 Mol $Ca(OH)_2$ auf 300 bis 350° entsteht Calciumbenzoat.

m-Phtalsäure $C_6H_4\genfrac{}{}{0pt}{}{(1)COOH}{(3)COOH}$, Isophtalsäure, Benzol-m-dicarbonsäure, Fp. ca. 300°, sublimiert; entsteht durch Oxydation von m-Xylol usw. Ihr Ba-Salz (6 aq.) ist in Wasser leicht löslich (Unterschied von den beiden isomeren Phtalsäuren).

p-Phtalsäure $C_6H_4\genfrac{}{}{0pt}{}{(1)COOH}{(4)COOH}$, Terephtalsäure, Benzol-p-dicarbonsäure, sublimiert ohne zu schmelzen; entsteht durch Oxydation von p-Xylol usw.

Uvitinsäure $(\overset{5}{C}H_3)C_6H_3\genfrac{}{}{0pt}{}{(1)COOH}{(3)COOH}$ (uva = Traube), Mesidinsäure, Fp. 287°; ist synthetisch aus Brenztraubensäure zu erhalten.

o-α-Homophtalsäure $C_6H_4\genfrac{}{}{0pt}{}{(1)CH_2COOH}{(2)COOH}$, Fp. 175° unter Anhydridbildung, entsteht beim Schmelzen von Gummigut mit KOH.

Polycarbonsäuren.

Trimesinsäure $C_6H_3(\overset{1.3.5}{COOH})_3$, Fp. 180°, entsteht durch Oxydation von Mesitylen; ferner durch Polymerisation von Propiolsäure usw.

Trimellithsäure $C_6H_3(\overset{1.2.4}{COOH})_3$; Hemimellithsäure $C_6H_3(\overset{1.2.3}{COOH})_3$.

Pyromellithsäure $C_6H_2(\overset{1.2.4.5}{COOH})_4$ + 2 aq.

Prehnitsäure $C_6H_2(\overset{1.2.3.4}{COOH})_4$ + 2 aq.

Benzolpentacarbonsäure $C_6H(COOH)_5$ + 6 aq., zersetzt sich beim Schmelzen; entsteht durch Behandeln von Holzkohle mittels konzentrierter H_2SO_4.

Mellithsäure $C_6(COOH)_6$, **Honigsteinsäure**; seidenglänzende feine Nadeln, leicht löslich in Wasser und in Alkohol; bildet als Al-Salz das in Braunkohlenlagern vorkommende Mineral Honigstein (Klaproth 1799); sie entsteht durch Oxydation von Holzkohle oder von Graphit mittels rauchender HNO_3 oder mittels alkalischer $KMnO_4$-Lösung, auch durch anodische Verbrennung von Kohleelektroden. Die Mellithsäure ist sehr beständig; durch Erhitzen mit Kalk gibt sie Benzol. Ihre Konstitution wurde durch Baeyer (1870) aufgeklärt.

Oxy-(alkohol-)säuren.

Mandelsäure $C_6H_5\overset{*}{C}HOH.COOH$, Phenylglycolsäure, enthält ein asymmetrisches C-Atom; kommt daher in drei Formen vor.

l-Mandelsäure, natürliche Mandelsäure, Fp. 133°, entsteht aus Amygdalin beim Erwärmen mit rauchender Salzsäure (Wöhler 1848); sie liefert ebenso wie die d-Mandelsäure durch Erhitzen auf 160° die

[l + d]-Mandelsäure, Paramandelsäure, Fp. 118°; löslich in Wasser; bei der Vergärung des Ammonsalzes mittels Penicillium glaucum wird die l-Form aufgezehrt, durch eine Schizomycetes-Art wird dagegen die d-Form zerstört; eine direkte Spaltung ist mittels der Cinchoninsalze möglich.

Tropasäure $C_6H_5\overset{*}{C}H(CH_2OH)COOH$, α-Phenylhydracrylsäure, besitzt ein asymmetrisches C-Atom und kommt dementsprechend in zwei optisch aktiven und einer inaktiven Form vor. Die inaktive Säure entsteht neben Tropin beim Erwärmen von Atropin und Hyoscyamin mit $Ba(OH)_2$ auf 60°.

Stycerinsäure $C_6H_5\overset{*}{C}H(OH)\overset{*}{C}H(OH)COOH$ enthält 2 asymmetrische C-Atome (vgl. oben Weinsäure).

Phenylparaffinketoncarbonsäuren.

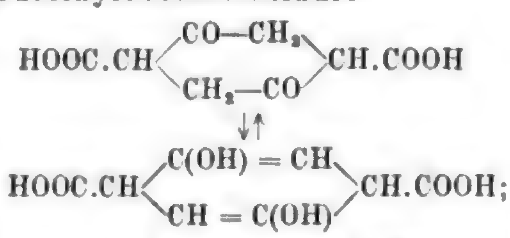
Phenylglyoxylsäure $C_6H_5CO.COOH$, Benzoylameisensäure, Fp. 65°; ist die Muttersubstanz der Isatinsäure und des Isatins.

Benzoylessigsäure $C_6H_5CO.CH_2COOH \rightleftarrows C_6H_5C(OH){=}CHCOOH$, Fp. 103° (unter Zersetzung); ihr Ester hat synthetische Bedeutung (vgl. Acetessigester).

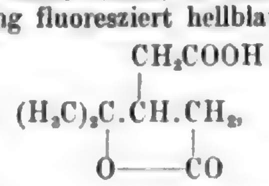
Carbonsäuren hydrierter cyklischer Verbindungen.[1])

Chinasäure $C_6H_7(OH)_4COOH$, Fp. 162°, optisch aktiv, findet sich in der echten Chinarinde (aus der sie als Nebenprodukt bei der Chinindarstellung gewonnen wird), in den Kaffeebohnen, im Heidelbeerkraut; kleine Mengen finden sich auch in den Zuckerrüben und im Heu.

Succinylobernsteinsäure

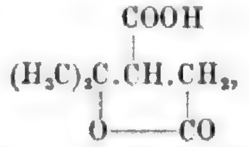


der Aethylester entsteht durch Einwirkung von Na auf Bernsteinsäureester; er bildet zwei tautomere Formen: hellgrüne trikline Prismen oder farblose Nadeln; unlöslich in Wasser, schwer löslich in Aether, leicht löslich in Alkohol; die alkoholische Lösung fluoresziert hellblau.

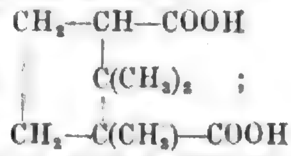
Terebinsäure 

Fp. 175°; entsteht u. a. durch Oxydation von Terpentinöl mittels HNO_3.

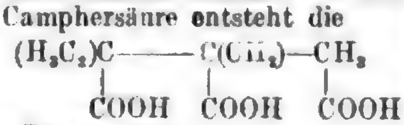
[1]) Vgl. auch die Artikel „isocyklische Systeme", „Terpene" u. a.

Terpenylsäure 

Fp. 90°; entsteht u. a. durch Oxydation von Terpentinöl mittels Chromsäure.

Camphersäure 

4 optisch aktive und zwei inaktive Formen; die d-Säure, Fp. 187°, $[\alpha]_D = +49{,}7°$ (in Alkohol), entsteht durch Erhitzen von d-Campher; die l-Säure erhält man durch Oxydation von Matricariacampher; die [d + l]-Säure, Paracamphersäure (Fp. 204°) entsteht durch Mischen aequimolekularer Lösungen der d- und der l-Säure. — Durch Oxydation der Camphersäure entsteht die

Campheronsäure 

Fp. 135° (unter Zersetzung).

Carbonsäuren mehrkerniger aromatischer Kohlenwasserstoffe.

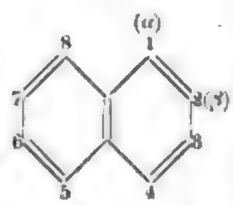
Diphensäure $HOO\overset{2}{C}.C_6H_4.C_6H_4.CO\overset{2}{O}H$, Fp. 229°.

o-Benzoylbenzoësäure $C_6H_5.CO.C_6H_4.\overset{2}{COOH}$ + aq, Fp. (wasserfrei) 127°.

Triphenylmethan-o-carbonsäure $(C_6H_5)_2CH.C_6H_4.\overset{2}{COOH}$, Fp. 162°.

Benzilsäure $(C_6H_5)_2C(OH)COOH$, Fp. 150°.

Triphenylessigsäure $(C_6H_5)_3C.COOH$, Fp. 265° (unter Zersetzung).

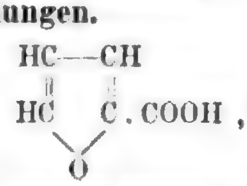
Säuren des Naphtalins: 

α-Naphtoësäure $C_{10}H_7\overset{\alpha}{COOH}$, Fp. 160°.

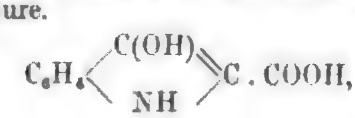
β-Naphtoësäure $C_{10}H_7\overset{\beta}{COOH}$, Fp. 182°.

Naphtalsäure $C_{10}H_6(\overset{1.8}{COOH})_2$, gibt bei 180° das Anhydrid.

Carbonsäuren heterocyklischer Verbindungen.

Brenzschleimsäure 

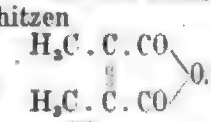
α-Furancarbonsäure, Fp. 134° (Scheele 1780, Pelouze 1834, Baeyer); entsteht bei der Destillation der Schleimsäure.

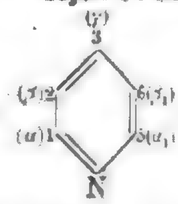
Indoxylsäure 

Fp. 123° (unter Zersetzung); steht dem Indigo nahe.

Cinchonsäure 

Fp. 168°; entsteht aus Cinchomeronsäure mittels Natriumalgam; gibt beim Erhitzen

Pyrocinchonsäureanhydrid 

Säuren des Pyridins: 

Picolinsäure $C_5H_4N(\overset{1}{COOH})$, 1-Pyridincarbonsäure, Fp. 135—136°;

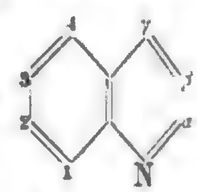
Nicotinsäure $C_5H_4N(\overset{2}{COOH})$, 2-Pyridincarbonsäure, Fp. 229°;

Isonicotinsäure $C_5H_4N(\overset{3}{COOH})$, 3-Pyridincarbonsäure, Fp. 304°, entstehen aus den entsprechenden Picolinen durch Oxydation.

Chinolinsäure $C_5H_3N(\overset{1.2}{COOH})_2$, 1-,2-Pyridincarbonsäure, Fp. 190° (unter Zersetzung), entsteht durch Oxydation von Chinolin.

Cinchomeronsäure $C_5H_3N(\overset{2.3}{COOH})_2$, 2,3-Pyridincarbonsäure, Fp. 266° (unter Zersetzung); entsteht durch Oxydation von Chinin, Cinchonin u. a.

Uvitoninsäure $C_5(\overset{1}{CH_3})H_2N(\overset{3.5}{COOH})_2$, Fp. 244°, entsteht durch Einwirkung von alkoholischem NH_3 auf Brenztraubensäure.

Säuren des Chinolins: 

Chinaldinsäure $C_9H_6N(\overset{\alpha}{COOH})$ + 2 aq., α-Chinolincarbonsäure, Fp. 156° (unter Zersetzung).

Cinchoninsäure $C_9H_6N(\overset{\gamma}{COOH})$ + 1[2] aq., γ-Chinolincarbonsäure, Fp. 254°; entsteht durch Oyxdation des Cinchonins.

Acridinsäure $C_9H_5N(\overset{\alpha.\beta}{COOH})_2$ + 1[2] aq, zersetzt sich bei 120 bis 130°.

Säurederivate.

Halogensubstituierte Carbonsäuren.

Monochloressigsäure $CH_2ClCOOH$, Fp. 62°, Sdp. 185 bis 187°; trimorph; entsteht beim Einleiten von Chlor in heißen Eisessig bei Gegenwart von Essigsäureanhydrid, Schwefel oder Phosphor; wirkt ätzend auf die Haut.

Dichloressigsäure $CHCl_2COOH$, Sdp. 190 bis 191°; bei Zimmertemperatur flüssig.

Trichloressigsäure CCl_3COOH (Dumas 1839), Fp. 55°, Sdp. 195°, wird als Acidum trichloraceticum in der Medizin zum Aetzen verwendet; zerfällt beim Kochen mit Wasser in Chloroform

und CO_2; mit überschüssigem Alkali entsteht ameisensaures und kohlensaures Salz.

Monobromessigsäure Fp. 50 bis 51°, Sdp. 208°; Dibromessigsäure Fp. 45 bis 50; Sdp. 232 bis 234°; Tribromessigsäure Fp. 135°, Sdp. 246° (unter Zersetzung).

Monojodessigsäure Fp. 84°; Dijodessigsäure Fp. 110°; Trijodessigsäure Fp. 150°.

Monofluoressigsäure Fp. 33° (aus Jodessigsäuremethylester durch Erhitzen mit HgF_2 und Verseifen); Difluoressigsäure Sdp. 134°; das Fluor ist ziemlich fest gebunden.

α-Chlorpropionsäure $CH_3CHClCOOH$, Sdp. 186°; α-Brompropionsäure $CH_3\overset{*}{C}HBrCOOH$, Fp. 24,5°, Sdp. 205°, ist durch Cinchonin in ihre optischen Antipoden gespalten worden.

β-Chlorpropionsäure CH_2ClCH_2COOH, Fp. 41,5°, Sdp. 203 bis 204°; β-Jodpropionsäureäthylester gibt beim Kochen mit Natriumamalgam in Aether und Verseifen Quecksilberdipropionsäure $Hg(CH_2CH_2COOH)_2$ (Prismen), die beim Kochen in wässeriger Lösung Oxyquecksilberpropionsäureanhydrid $\underbrace{CH_2—CH_2—CO}_{HgO}$ liefert.

αα-Dichlorpropionsäure CH_3CCl_2COOH, Sdp. 185 bis 190°; das Silbersalz gibt beim Erwärmen in wässeriger Lösung Brenztraubensäure.

αβ-Dichlorpropionsäure $CH_2ClCHClCOOH$ Fp. 50°, Sdp. 210°; αβ-Dibrompropionsäure ist dimorph.

α-Bromisobuttersäure $(CH_3)_2CBrCOOH$, Fp. 48°, Sdp. 199°; das Bromid dieser Säure wird durch Zink in ätherischer Lösung in das Dimethylketen $(CH_3)_2C{=}CO$ umgewandelt, dieses stellt eine weingelbe Flüssigkeit dar, die sich bei gewöhnlicher Temperatur in das Tetramethyldiketocyclobutan umwandelt.

Dialkylbromessigsäuren $R_2CBrCOOH$; ihre Amide dienen zum Teil als Schlafmittel.

Aminocarbonsäuren.[1])

Serin $(HO)CH_2\overset{*}{C}H(NH_2)COOH$, α-Aminohydracrylsäure, Fp. 246° (unter Zersetzung), die [d + l]-Form entsteht aus Seidenleim (Sericin), Horn, Gelatine, Casein durch Spaltung mittels verdünnter Säuren.

Cystin $HOOC.\overset{*}{C}H(NH_2).CH_2.S.S.CH_2.\overset{*}{C}H(NH_2).COOH$, zersetzt sich bei 258 bis 261°; die l-Form ist der Hauptbestandteil der schwefelhaltigen Eiweißsubstanz.

Arginin $NH_2(HN{:})C.NHCH_2CH_2CH_2\overset{*}{C}H(NH_2)COOH$ ist ein Spaltungsprodukt der Eiweißstoffe; ihm nahe stehen Ornithin, Prolin, Lysin u. a.

Asparaginsäuren $\begin{array}{l} H_2N.\overset{*}{C}HCOOH \\ \quad | \\ CH_2COOH \end{array}$; die [d + l]-Form entsteht aus den Komponenten; die l-Form findet sich in der Runkelrübenmelasse; die d-Form entsteht beim Kochen von d-Asparagin mit HCl.

Phenylglycocoll $C_6H_5NH.CH_2COOH$, Anilidoessigsäure, Fp. 127°.

[1]) Vgl. auch die Artikel „Ammoniakderivate" und „Kohlensäurederivate".

Oxanilsäure $C_6H_5NH.COCOOH$, Fp. 150°, entsteht aus Oxalsäure beim Erhitzen mit Anilin.

Oxindol $C_6H_4\langle\begin{array}{l}CH_2CO\\NH\end{array}\rangle O$, o-Amidophenylessigsäurelactam, Fp. 120°.

Phenylalanin $C_6H_5CH_2\overset{*}{C}H(NH_2)COOH$, β-Phenyl-α-amidopropionsäure, sublimiert unzersetzt bei langsamem Erhitzen; findet sich in seiner l-Form neben Asparagin in dem keimenden Samen von Lupinus luteus (Lupine, Wolfsbohne); entsteht durch Spaltung oder Fäulnis von Eiweiß, Casein, Leim u. a.

p-Oxyphenylalanin $(\overset{4}{O}H)C_6H_4CH_2\overset{*}{C}H(NH_2)COOH$, Tyrosin, Fp. 235°, seidenglänzende Nadeln; löslich in heißem Wasser; schwer löslich in Alkohol, unlöslich in Aether; findet sich in altem Käse (τυρός = Käse), in der Milz, der Pankreasdrüse und bei gewissen Krankheiten in der Leber; entsteht aus Harn, Eiweiß u. a. beim Kochen mit Säuren, beim Schmelzen mit KOH (Liebig 1846) oder durch Fäulnis; seine Konstitution wurde von E. Erlenmeyer und Lipp (1883) aufgeklärt. Tyrosin gibt mit $Hg(NO_3)_2$ in wässeriger Lösung einen gelben Niederschlag, der beim Kochen mit konzentrierter HNO_3 dunkelrot gefärbt wird (empfindliche Reaktion).

Isatin

$$C_6H_4\langle\begin{array}{l}CO.C\\NH\end{array}\rangle O \rightleftarrows C_6H_4\langle\begin{array}{l}CO\\N\end{array}\rangle C(OH)$$

Fp. 201°, orangerote Prismen (vgl. den Artikel „Indigogruppe").

Thiosäuren.

Vgl. den Artikel „Thio- und Sulfoverbindungen".

Säureanhydride.

a) Einfache Anhydride und gemischte Anhydride organischer Säuren, Acyloxyde.

Essigsäureanhydrid $(CH_3CO)_2O$, Aethansäureanhydrid, Sdp. 137°; d^{20} 1,073; stechend riechende Flüssigkeit; in 10 Teilen H_2O zunächst unzersetzlich löslich.

Propionsäureanhydrid $(CH_3CH_2CO)_2O$, Sdp. 168°.

Buttersäureanhydrid $(CH_3CH_2CH_2CO)_2O$ Sdp. 181,5°.

Acetylformyloxyd $HCO.O.OCCH_3$, Sdp. (18 mm) 29°, aus Ameisensäure und Essigsäureanhydrid in der Kälte.

Benzoësäureanhydrid $(C_6H_5CO)_2O$, Fp. 42°, Sdp. 360°.

Phtalsäureanhydrid $C_6H_4\langle\begin{array}{l}CO\\CO\end{array}\rangle O$, Fp. 128°, Sdp. 284°; sublimiert leicht; dient zu Kondensationsreaktionen.

b) Gemischte Anhydride mit anorganischen Säuren.

α) Anhydride mit Halogenwasserstoffsäuren; Säurehaloide.

Ameisensäurechlorid $HCO.Cl$ ist unbe-

kannt; bei Versuchen zu seiner Darstellung erhält man CO und HCl.

Acetylchlorid $CH_3CO.Cl$, Aethanoylchlorid, Sdp. 55°, d° 1,130, farblose, stechend riechende Flüssigkeit; zersetzt sich energisch mit H_2O; gibt mit Chlor die Chloride der Chloressigsäuren (s. unter „Halogensubstituierte Carbonsäuren").

Acetylbromid, Sdp. 81°; Acetyljodid, Sdp. 108°; Propionylchlorid $CH_3CH_2CO.Cl$, Sdp. 80°.

n-Butyrylchlorid $CH_3(CH_2)_2CO.Cl$, Sdp. 100° gibt mit $AlCl_3$ Triäthylphloroglucin.

Isobutyrylchlorid $(CH_3)_2CHCO.Cl$, Sdp. 92° gibt bei der Einwirkung von tertiären Aminen Tetramethyldiketocyclobutan.

Benzoylchlorid $C_6H_5CO.Cl$, Fp. —1°, Sdp. 198°; stechend riechende Flüssigkeit; hat außerordentlich große Reaktionsfähigkeit.

Phtalylchlorid $C_6H_4\begin{matrix}(1)CO.Cl\\(2)CO.Cl\end{matrix}$, Fp. 0°, Sdp. 275°.

Benzotrichlorid $C_6H_5.CCl_3$, Benzoësäuretrichlorid, Fp. —22,5°, Sdp. 213°; entsteht beim Einleiten von Chlor in siedendes Toluol; gibt wichtige Kondensationsreaktionen.

β) Anhydride mit Salpetersäure u. a.

Diacetylorthosalpetersäure $(CH_3COO)_2N(OH)_3$, Sdp. 128°, d^{15} 1,197; aus HNO_3 und Essigsäureanhydrid; farblose, an der Luft rauchende Flüssigkeit, die sich mit H_2O in HNO_3 und Essigsäure zersetzt; mit überschüssigem Essigsäureanhydrid entsteht Tetranitromethan $C(NO_2)_4$.

Acetylnitrat $CH_3COO.NO_2$, Sdp. (77 mm) 22°, aus N_2O_5 und Essigsäureanhydrid; an der Luft rauchende Flüssigkeit, die beim schnellen Erhitzen explodiert; gibt bei 60° Tetranitromethan; starkes Nitrierungsmittel für aromatische Subtanzen.

Essigborsäureanhydrid $(CH_3COO)_3B$, Fp. 121°; aus B_2O_3 und Essigsäureanhydrid; liefert mit Alkoholen Borsäureester, mit Carbonsäuren andere gemischte Anhydride der Borsäure.

γ) Innere Anhydride.

Lactide $O\begin{matrix}CH(CH_3)CO\\COCH(CH_3)\end{matrix}O$, entstehen durch Erhitzen von Milchsäure; [d + l]-Form: Fp. 125°; Sdp. 255°; d- bezw. l-Form: Fp. 95°.

γ-Lactone.

Butyrolacton $\begin{matrix}CH_2CH_2\\|\\CH_2CO\end{matrix}>O$, Sdp. 206° (Saytzeff 1873; Erlenmeyer 1880; Bredt, Fittig).

γ-Valerolacton $\begin{matrix}CH_2CH(CH_3)\\|\\CH_2\text{——}CO\end{matrix}>O$, Sdp. 206°; findet sich im rohen Holzessig.

Phtalid $C_6H_4<\begin{matrix}CH_2\\CO\end{matrix}>O$, Fp. 83°, Sdp. 290°; entsteht aus o-Oxymethylbenzoësäure; ferner aus Phtalsäureanhydrid durch Reduktion usw.

Mekonin $\overset{5,6}{(CH_3O)_2}C_6H_2<\begin{matrix}CH_2\\CO\end{matrix}>O$, Fp. 102°, ist das Lacton der (nur in Form von Salz enbeständigen) Mekoninsäure (μήκων = Mohn), die im Opium enthalten ist (Couerbe 1832; Wöhler und Liebig 1842).

Cumarin $C_6H_4<\begin{matrix}CH = CH\\|\\O\text{——}CO\end{matrix}$, Fp. 70°, Sdp. 290°; findet sich im Waldmeister (Asperula odorata), in den Tonkabohnen von Dipterix odorata (guiaccischer Tonkabaum), im Steinklee (Melilotus officinalis) u. a. Entsteht nicht durch Erhitzen der o-Cumarsäure.

Umbelliferon $\overset{4}{(OH)}C_6H_3<\begin{matrix}CH = CH\\|\\O\text{——}CO\end{matrix}$ 4-Oxycumarin, Fp. 240°, findet sich in der Rinde des Seidelbastes (Daphne mezereum); entsteht bei der Destillation von Asa foetida und von Galbanum („Mutterharz", von Ferula erubescens).

Diphenylphtalid $C_6H_4<\begin{matrix}C = (C_6H_5)_2\\CO\end{matrix}>O$, Fp. 115°, ist eine Muttersubstanz der Phtaleïne (Phenolphtaleïn usw.).

Säureperoxyde.

Diacetylperoxyd $(CH_3CO)_2O_2$, Fp. 30°, Sdp. (21 mm) 63°; aus Essigsäureanhydrid und Wasserstoffperoxyd; unlöslich in H_2O, leicht löslich in Alkohol, Aether usw.; hat einen stechenden, ozonartigen Geruch; ist sehr unbeständig und besitzt stark oxydierende Eigenschaften; zersetzt sich im Licht und explodiert heftig beim Erhitzen.

Benzoylperoxyd $(C_6H_5CO)_2O_2$, Fp. 110°, verpufft beim Erhitzen; gibt in ätherischer Lösung mit Natriumalkoholat Benzoylwasserstoffperoxydnatrium; aus diesem scheidet Kohlensäure das

Benzoylwasserstoffsuperoxyd $C_6H_5CO.OOH$, Fp. 41 bis 43°, ab.

Säureamide.

Vgl. die Artikel „Ammoniakderivate" und „Kohlensäurederivate".

Säureester.

Vgl. den Artikel „Ester".

Säurenitrile.

Vgl. den Artikel „Cyanverbindungen".

Literatur. *V. v. Richter, Organische Chemie; bearbeitet von R. Anschütz, G. Schroeter und H. Meerwein. Bonn 1909—1918.*

K. Schaum.

---

de Saussure

Henri

Geboren am 27. November 1829 in Genf, gestorben am 20. Februar 1905 daselbst. Er war der Großneffe des bekannten Horace Bénédict de Saussure. Er machte 1854 bis 1856 eine wissenschaftliche Expedition nach Mexiko und

hat sich vor allem durch seine Untersuchungen an Insekten, besonders Hymenopteren, verdient gemacht.

Er schrieb: „Mélanges orthoptérologiques" (Genf 1863 bis 1878, 6 Hefte), „La Grotte du Scé" 1870), „Mémoire pour servir à l'histoire naturelle du Mexique, des Antilles et des États-Unis" (Genf 1858 bis 1871), „Etudes sur les Orthoptères et les Myriapodes" (mit A. Humbert in: Mission scientifique du Mexique et de l'Amérique centrale" (Paris 1872 bis 1874), „Note sur le Cervus paludosus et les espèces voisines" (Genf 1883), „Les Explorateurs genevois des Alpes" (1879), „La question du lac" (1880).

Literatur. *La Grande Encyclopédie.*

W. Harms.

---

de Saussure
Horace Bénédict

Geboren am 17. Februar 1740 in Conches bei Genf, gestorben am 22. Januar 1799 in Genf. Er war von 1762 bis 1786 Professor der Philosophie an der Akademie in Genf; in den Jahren 1758 bis 1779 unternahm er für geologische und meteorologische Zwecke Reisen in den Alpen, Vogesen, im Jura, Dauphiné, in Italien und Frankreich. 1786 nahm er seinen Abschied, wurde Mitglied des Rates der Zweihundert in seiner Vaterstadt und nach deren Vereinigung mit Frankreich, bei welcher Gelegenheit er sein Vermögen zum größten Teil verlor, 1798 Mitglied der Assemblé nationale. Er beschäftigte sich mit den Problemen der Ausdehnung durch Wärme und der Verdampfung und Verdunstung; unter seinem Namen bekannt ist das 1783 von ihm erfundene Haarhygrometer.

Literatur. ***J. Senebier,*** *Mémoire historique sur la vie et les écrits d'Horace Bénédict de S., Genf 1801.* — ***Cuvier,*** *Éloge de S., Éloges I.*

E. Drude.

---

de Saussure
Nicolas Theodore.

Geboren am 14. Oktober 1767 als Sohn des berühmten Geognosten und Professors der Philosophie an der Akademie zu Genf, Horace de Saussure, war Honorarprofessor der Mineralogie und Geologie an der gleichen Akademie, ohne Vorlesungen zu halten; er starb am 18. April 1845 in Genf, wo er während seines langen Lebens ausgezeichnete Experimentaluntersuchungen über den Stoffwechsel der Pflanzen ausgeführt hat. Seine in der Schrift „Recherches chimiques sur la végétation" zusammengestellten Arbeiten (Paris 1804) waren mit seinen früheren und späteren Veröffentlichungen, die sich namentlich mit der Rolle beschäftigten, die Kohlensäure und Sauerstoff bei dem Wachstum der Pflanzen spielen, grundlegend für die Entwicklung der Pflanzenphysiologie. Zu dieser Reihe von Arbeiten gehören wertvolle Forschungen über den Keimprozeß, die Verzuckerung der Stärke und über Gärungsvorgänge. Auch rein chemische Beobachtungen über Alkohol, Aether, Aethylen, und seine Versuche, organische Substanzen auf dem Wege der Verbrennung zu analysieren, sind bemerkenswert. Als Zeitschrift, in der er seine Untersuchungen veröffentlichte, benutzte er die Memoires de l'Académie de Genève.

E. von Meyer.

Sauveur
Joseph.

Geboren am 24. März 1653 in La Flèche, gestorben am 9. Juli 1716 in Paris. Er lebte in Paris als Privatlehrer der Mathematik, wurde dann mit Mariotte bekannt und unterstützte diesen bei seinen hydraulischen Versuchen. Späterhin wurde er Pagenlehrer, 1686 Professor der Mathematik am Collège royal, 1696 Mitglied der Akademie der Wissenschaften, 1703 Examinator der Ingenieure. Sauveur hat trotz völlig mangelnden musikalischen Gehörs grundlegende Untersuchungen auf dem Gebiet der Akustik geliefert, die Schwingungszahlen der Töne bestimmt und die Erscheinung der Obertöne erklärt.

Literatur. ***Fontenelle,*** *Éloge de J. S., in den Memoiren der Akademie der Wissenschaften. Paris 1716.* — ***Montucla,*** *Histoire des mathématiques.*

E. Drude.

Savart
Félix.

Geboren am 30. Juni 1791 in Mézieres, gestorben am 16. März 1841 in Paris. Er war Feldchirurg in der französischen Armee, ließ sich 1816 als Arzt in Straßburg nieder, wurde 1820 Professor der Physik an einer Privatanstalt in Paris, später Konservator des physikalischen Kabinets im Collège de France, seit 1827 Mitglied der Akademie. Gemeinsam mit Biot unternahm er magnetische Untersuchungen und entdeckte 1820 das Grundgesetz des Elektromagnetismus, unter dem Namen Biot-Savartsches Gesetz bekannt. Er untersuchte die Membranschwingungen und ihre Gesetze, unternahm Torsionsversuche, und konstruierte die als Savartsches Rad bekannte Zahnsirene zur Bestimmung der Schwingungszahl der Töne.

E. Drude.

Saytzeff

Alexander.

Geboren am 2. Juli 1841 in Kasan, gestorben 1911 als Professor der Chemie an der dortigen Universität, war Schüler von Hermann Kolbe und hat zusammen mit den zeitgenössischen russischen Chemikern, besonders Beilstein, Butlerow, Markownikoff, Mendelejeff, Mentschutkin wesentlich zur Verbreitung und Vertiefung der chemischen Wissenschaft in Rußland beigetragen. Seine Experimentaluntersuchungen erschienen teils in Liebigs Annalen, teils im Journal für praktische Chemie dnd behandelten lediglich Gegenstände aus dem uereiche der organischen Chemie. Für die seit Ber Zeit vor 50 Jahren mächtig wachsende synthetische Richtung waren seine Forschungen über tertiäre und sekundäre Alkohole besonders bedeutsam. Ebenso haben die Arbeiten über ungesättigte Säuren wesentlich zur Aufklärung dieses Gebietes gedient. Zwei Brüder von Saytzeff, Konstantin und Michael, haben sich ebenfalls als tüchtige Chemiker bewährt.

E. von Meyer.

Scaphopoda.

1. Schale und Mantel. 2. Atmungsorgane. 3. Fuß. 4. Sinnesorgane. 5. Nervensystem. 6. Muskulatur. 7. Darmsystem. 8. Kreislaufsystem. 9. Keimdrüsen und Entwickelung. 10. Systematik. 11. Biologie und Verbreitung.

Zwischen den Schnecken und den Muscheln steht die Molluskenklasse der Scaphopoden oder Solenoconchen. Wie die ersteren besitzen sie Radula, Kiefer und Buccalganglien, sowie nur eine Keimdrüse, während sie mit den letzteren in der bilateralen Symmetrie und der Beschaffenheit des übrigen Nervensystems übereinstimmen; auch ihr Fuß ist dem einiger Muscheln recht ähnlich, freilich kann man sie stammesgeschichtlich nicht als Bindeglied zwischen den beiden genannten Klassen ansehen.

1. Schale und Mantel. Bei der großen Mehrzahl der Scaphopoden bildet die Schale eine schwach gekrümmte, von hinten nach vorn erweiterte, an beiden Enden offene Röhre (Fig. 1); eine kleinere Gruppe besitzt eine an beiden Enden verengte Röhre. Das Tier ist bilateralsymmetrisch; die Rückenseite entspricht der Konkavität der Schale. Ihrer Innenseite liegt der Mantel an, so daß sich beim ausgestreckten Tier die Mantelhöhle durch die ganze Schale hindurchzieht (Fig. 2). Aehnlich wie bei manchen Muscheln, deren Mantel unten geschlossen ist, umgibt er den übrigen Körper an den Seiten und unten, während er vorn und hinten offen bleibt. Am vorderen Rande ist der Mantel meistens beträchtlich verdickt und enthält hier eine kräftige Muskulatur, häufig auch starke Drüsen, in der Nähe des hinteren Endes findet sich ein schwächerer Wulst; dadurch kann die Mantelhöhle nach außen abgeschlossen werden. Durch die vordere Oeffnung wird der Fuß nebst den Cirren hervorgestreckt, während die hintere ähnlich dem Analsipho der Muscheln zur Entleerung der Auswurfs- und Geschlechtsstoffe dient.



Fi. 1. Dentalium elephantinum. Links Tier, rechts Schale; f Fuß, l Lebergegend, o hintere Oeffnung des Mantelsacks.

2. Atmungsorgane. Besondere Atmungsorgane fehlen, vielleicht dienen einige Wimperringe in der Nähe des Afters einer Bewegung des Wassers in der Mantelhöhle. Da man eigentümliche Schluckbewegungen des Enddarms beobachtet hat, wurde diesem, sowie der „Rektaldrüse", respiratorische Bedeutung beigelegt. Vor allem dürfte die Innenfläche des Mantels der Atmung dienen.

3. Fuß. Der zum Eingraben dienende Fuß ist im Querschnitt rundlich, oben mehr oder weniger deutlich mit einer Rinne versehen. Er hat entweder an beiden Seiten je eine quere Hautfalte oder eine ringförmige, gezackte Verbreiterung an seinem Ende. Der Fuß hat eine ähnliche Form wie bei manchen Muscheln (Solen), bei denen er gleichfalls vorn hervorgestreckt und zum Graben verwendet wird. Während er bei der einen Familie der Scaphopoden nur einfach zurückgezogen werden kann, wird in der anderen Familie der Endteil in den Anfangsteil eingestülpt, so daß der Fuß in diesem Zustande röhrenförmig erscheint. Hier findet sich am Ende eine Gruppe von Drüsenzellen, während in der anderen Fußform außer zerstreuten Drüsenzellen jederseits von der Rinne, in die sie ausmünden, eine Gruppe größerer Drüsenzellen vorkommt.

4. Sinnesorgane. Unter den Sinnesorganen spielen die Cirren eine Hauptrolle, zahlreiche fadenförmige, am Ende verdickte Anhänge, die aus der vorderen Schalenöffnung hervorgestreckt werden können und der Beschaffung von Nahrung dienen. Sie entspringen von den Rändern zweier plattenförmigen Hautfalten, die in der Nähe ihrer oberen Kante am Körper befestigt sind, und zwar hinter dem Grunde des Mundkegels. Die Cirren

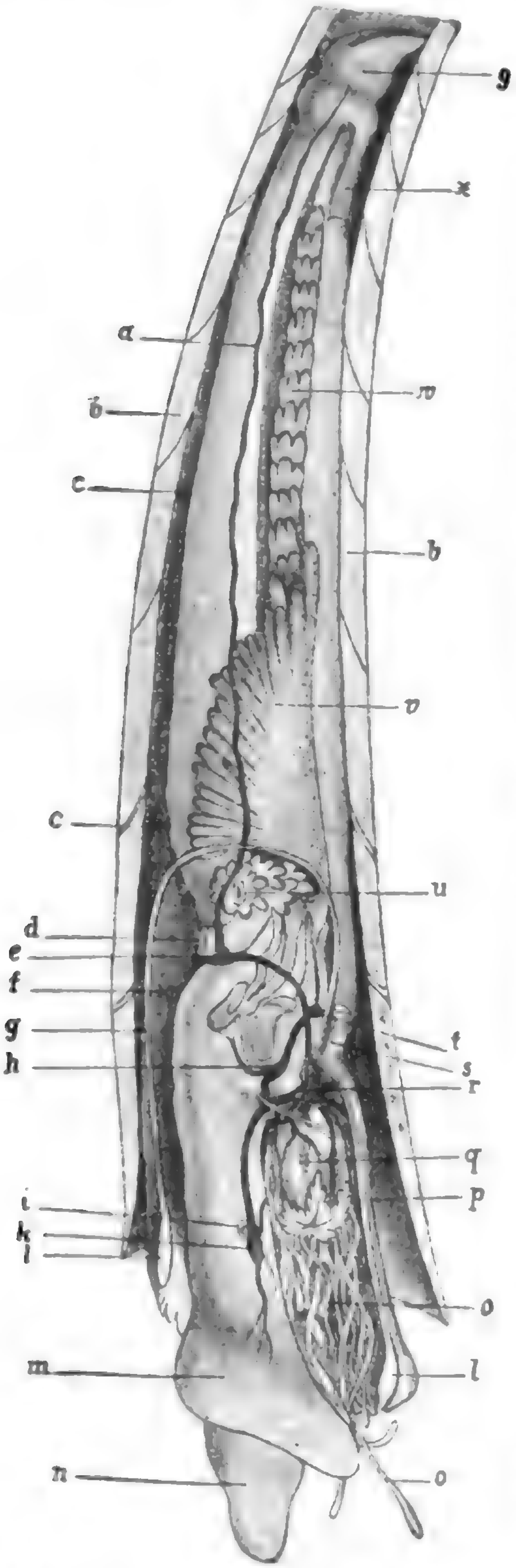


Fig. 2. Anatomie von Dentalium entale. Rechte Hälfte der Schale und vorderer Teil des Mantels entfernt. a Vom Visceralganglion nach oben ziehender Nerv (Mantelnerv), b Schale, c Raum zwischen Mantel und Schale, d After, e Visceralganglion, f Mantelhöhle, g Mantel, h unteres, t oberes Buccalganglion, i Statocyste, k Pedalganglion, m seitliche Falten des Fußes, n Endkegel des Fußes, o Fadententakel, l vorderer Mantelrand, p blattförmige Mundanhänge, q Schnauze, r Gehirnganglion, s Schalen- oder Spindelmuskel (durchschnitten), u rechte Nephridial- (zugleich Geschlechts-) Oeffnung, v Verdauungsdrüse (Leber), w Gonade, x oberes Ende des Spindelmuskels, y hinteres offenes Ende des Mantels.

stellen sich in fertig entwickelter Form als hohle Schläuche dar, die von Längsmuskeln und einem Nerv durchzogen und außen mit Wimpern besetzt sind; die Epithelzellen sind rückgebildet, die Sinneszellen finden sich in größerer Zahl im Rande der Endkeule, während lange Hautdrüsenzellen, die ein klebriges Sekret absondern, in eine flache Grube ausmünden, die sich an der Seite der Endkeule findet. Mehr am Innenrande der Hautfalten stehen Entwickelungsstadien von Cirren, die durch Uebergänge mit den fertigen verbunden sind und diese ersetzen, wenn sie abgerissen werden. Augen fehlen und sind auch während der Entwickelung nicht nachzuweisen. Ein Paar Statocysten (oder Otocysten) liegt neben den Fußganglien; sie stellen Bläschen dar mit zahlreichen Kalkkörnchen. Ein hohes Sinnesepithel liegt unter der Zunge, wohl ein Geschmacksorgan; es wird als Subradularorgan bezeichnet und findet sich in ähnlicher Ausbildung nur bei Chitoniden wieder.

5. Nervensystem. Das Nervensystem der Scaphopoden ist im wesentlichen dem der Muscheln sehr ähnlich, während die Innervierung der Mundgegend der von Chitoniden und einigen Schnecken am nächsten steht. Die Cerebralganglien liegen dicht zusammen und versorgen hauptsächlich den Cirrenapparat, ihnen schließen sich unmittelbar die Pleuralganglien am Anfang der Visceralkommissur an, die hinten ein Paar dreieckige Ganglien enthält, die den hinteren Teil des Tieres innervieren. Der Fuß wird durch ein Paar dicht zusammenliegender Pedalganglien versorgt; von diesen verläuft jederseits eine Verbindung zu dem Cerebralganglion, die auch einen Zweig zum Pleuralganglion abgibt. Die Cerebralganglien sind durch einen um den Schlund verlaufenden Ring verbunden; dessen Ganglien versorgen den Rüssel und hängen mit den Ganglien des Subradularorgans, sowie mit den Buccalganglien zusammen.

6. Hauptmuskeln. Die Hauptmuskeln sind die Rückzieher des Fußes, sie entspringen von der Schale am Vorderrande des hinteren Mantelwulstes und zerteilen sich bei Dentalium vorn in zahlreiche Bündel, die die Längsmuskeln des Fußes darstellen und von Ringmuskeln umgeben sowie von Radialbündeln gekreuzt werden. Diese fehlen bei Siphonodentalium und die Längsmuskeln verlaufen, ohne sich zu zerteilen, bis in die Fußspitze, so

daß diese von ihnen eingestülpt werden kann. Im Mantel haben Vorder- und Hinterende eine stärkere Muskulatur.

7. Darmsystem. Die Mundöffnung ist am Ende eines rüsselartigen Vorsprungs gelegen, umgeben von einigen blattförmigen Anhängen. Zu beiden Seiten des Mundrohres findet sich eine Ausbuchtung, die mit ihm durch einen Spalt zusammenhängt. Darauf folgt der Schlundkopf von ähnlichem Bau wie bei Schnecken; vorn und oben enthält er einen hufeisenförmigen, scharfrandigen Kiefer. Gegenüber vor der Zunge liegt das sensible Subradularorgan. Die Zunge enthält ein Paar großzelliger Knorpel und die Muskulatur, sie wird von einer Radula bedeckt, deren Hinterende wie gewöhnlich in einer besonderen Scheide steckt, von der aus sie sich erneuert in dem Maß, in dem sie vorn abgenutzt wird. Die Zähnchen der Radula sind sehr einförmig, es ist in jeder Querreihe eine kleine und flache Mittelplatte, jederseits eine ziemlich große Seitenplatte mit deutlich entwickelter Schneide und eine flache schneidenlose Randplatte vorhanden.

Der Schlund ist ziemlich kurz und gerade, er weist jederseits eine starke drüsige Erweiterung auf. Ein Magen ist nicht scharf gegen den Darm abgesetzt, in eine U-förmig gebogene Erweiterung mündet die symmetrische Leber mit weiten Oeffnungen aus. Der Enddarm ist etwas zusammengeknäuelt und mündet hinter dem Fuß in die Mantelhöhle. Mit ihm hängt eine aus mehreren verzweigten Blindschläuchen bestehende „Rektaldrüse" zusammen, die indessen keine Drüsenzellen enthält, sondern nur von Wimperzellen ausgekleidet ist, so daß ihre Auffassung als „Wasserlunge" nicht unwahrscheinlich ist. Jederseits vom Enddarm liegt ein etwas gelappter Nierensack, ohne Zusammenhang mit dem der anderen Seite und dem Herzbeutel; die Ausmündungen liegen neben und etwas hinter dem After.

8. Kreislaufsystem Das Kreislaufsystem der Scaphopoden steht auf einer sehr niedrigen Stufe, es fehlen geschlossene Gefäße völlig, das Blut bewegt sich nur in Spalträumen zwischen den Organen. Das Herz ist rudimentär, es stellt eine Einstülpung der oberen Wand eines völlig geschlossenen Herzbeutels dar, die nur durch eine einfache Oeffnung mit der Umgebung zusammenhängt und der Vorkammern entbehrt. Da der Herzbeutel weder mit den Keimdrüsen, noch mit den Nieren in Verbindung steht, sind diese Verhältnisse offenbar nicht ursprünglich, sondern im Vergleich mit primitiven Mollusken sekundär vereinfacht. Einwärts von den Nierenöffnungen finden sich kleine Querspalten, die mit dem Analsinus zusammenhängen sollen und von zweifelhafter Bedeutung sind.

9. Keimdrüsen und Entwickelung. Die Geschlechter sind bei den Scaphopoden getrennt. Die Keimdrüse erstreckt sich vom After nach hinten, bei D e n t a l i u m nur auf der Rückenseite, bei S i p h o n o d e n t a l i u m den Mantel auch an der Bauchseite erfüllend. Ausführungsgänge und Begattungsorgane fehlen ganz, zur Zeit der Reife verwächst die Keimdrüse mit der rechten Niere und entleert sich durch diese in die Mantelhöhle, von wo die Produkte durch Zusammenziehungen des Fußes aus der hinteren Oeffnung ausgestoßen werden. Nach der F u r c h u n g entsteht eine Flimmerlarve, die durch einen dicken Ringwulst ausgezeichnet ist, der aus 3 Ringen von Wimperzellen besteht (Fig. 3). Früh entwickelt sich

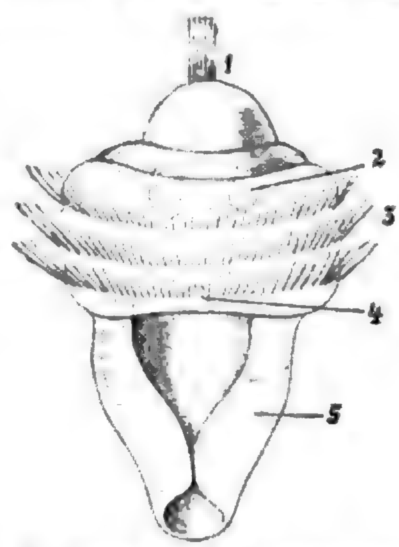


Fig. 3. 37 Stunden alte Larve von D e n t a l i u m , von hinten und unten. Nach K o w a l e v s k y. 1 Scheitelschopf, 2 Anlagen der Gehirnganglien (Scheitelröhren), 3 Velum, aus drei Ringsreihen von Wimpern bestehend, 4 Mund (unter dem Velarwulst verborgen), 5 Mantelfalte.

ein Paar Mantelfalten, die unten miteinander verwachsen. Die Cerebralganglien entstehen aus einem Paar ektodermaler Einstülpungen, die sich dann abschnüren.

10. Systematik. Die äußere Form der Scaphopoden ist höchst einförmig. Hauptsächlich die Form der beiden Oeffnungen und die Skulptur der Schale, die bald glatt, bald längsgerippt, rund oder kantig ist, werden in der Systematik verwendet. Hinten ist die Schale gerade abgeschnitten oder in kleine Lappen ausgezogen, häufig an der Bauchseite mit einem kurzen oder langen Schlitz, der zuweilen in eine Reihe von Löchern zerfällt.

Das Hauptmerkmal für die Unterscheidung der beiden Familien gibt das Verhalten des Fußes ab, der in der einen mit 2 seitlichen Lappen ausgestattet ist, in der anderen ohne solche meistens eine Endscheibe auf-

weist. So teilt man die Klasse folgendermaßen ein:

Familie Dentaliidae. Gattung Dentalium Linné (mit mehreren Untergattungen).

Familie Siphonodentaliidae. Gattung Entalina Monterosato, Gattung Siphonodentalium M. Sars, Gattung Cadulus Philippi.

II. Biologie und Verbreitung. Alle Scaphopoden sind Meeresbewohner. Aehnlich wie viele Muscheln graben sie sich in sandigen Boden ein, aus dem ihr Hinterende etwas hervorragt, dabei wechseln sie beständig den Ort; ihr Fuß ist sehr beweglich. Im allgemeinen bewohnen die Siphonodentaliiden tieferes Wasser als die Dentaliiden, indessen sind manche Arten in sehr verschiedenen Tiefen gefunden worden. Die Gattungen sind über alle Meere verbreitet, die größte Artenzahl findet sich im indopazifischen Meer, der atlantische Ozean ist an ihnen verhältnismäßig arm.

Literatur. **Simroth,** *Mollusca in Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs Bd.* 3, *1. Abt. 1894.* — **Tryon-Pilsbry,** *Manual of Conchology structural and systematic, vol.* 17. *1897/98.* — **Boissevain,** *The Scaphopoda of the Siboga Expedition. Siboga-Exp. vol.* 54. *1906.*

J. Thiele.

Scaphopoda.

Paläontologie.

1. Allgemeines. 2. Struktur der Schale. 3. Geologisches Vorkommen und Systematik.

1. Allgemeines. Die Schale der Scaphopoden hat eine röhrenförmige Gestalt. Sie ist an beiden Seiten offen. Eine Orientierung ergibt sich daraus, daß in dem erweiterten vorderen Abschnitt der Röhre die Schnauze, die Fühler und der Fuß, in dem engeren, hinteren Teile Leber und Gonaden liegen. Daraus resultieren die Bezeichnungen Vorderrand und Hinterrand (oder Spitze) des Gehäuses.

Unter den fossilen Formen lassen sich nach der Gestalt des Gehäuses zwei Haupttypen unterscheiden:

a) Der Dentaliumtypus. Die Röhre erweitert sich gleichmäßig nach vorn. Dieser Typus ist seit dem Silur vorhanden.

b) Der Cadulustypus. Die Röhre ist in dem mittleren Abschnitte am weitesten, sie ist vorn und hinten verengt. Dieser Typus findet sich erst seit der Kreide.

Fast immer ist die Röhre leicht eingekrümmt und zwar in der Weise, daß die konvexe Seite der ventralen des Tieres entspricht. Der Hinterrand der Schale ist entweder einfach gerade abgestutzt oder zeigt auf der ventralen Seite einen ± langen Schlitz oder ist gar lappig.

2. Struktur der Schale. Die Schale wächst in der Weise, daß am Vorderrande neue Schale abgesondert, am Hinterrande dagegen Schale abgebrochen resp. resorbiert wird. Die abgebrochene resp. resorbierte Spitze wird entweder durch eine einfache Scheidewand mit runder Oeffnung abgeschlossen oder es bildet sich an der Bruchstelle von der inneren Schalenlage aus eine kleine sekundäre Spitze.

Die Schale selbst besteht aus kohlensaurem Kalk. Sie wird von drei Schalenlagen aufgebaut. Die äußere Schalenlage, das Periostracum, ist dünn und strukturlos. Sie ist Träger der etwa vorhandenen Längs- oder Querskulptur. Die mittlere Schalenlage, das Ostracum, zeigt im Längsschnitt nach vorn und innen konvergierende Schichten. Sie besteht aus kreuzweis übereinanderliegenden Prismenlagen. Ausgekleidet wird die ganze Röhre von der inneren Schalenlage, dem Hypostracum. Es besteht aus länglichen Prismen, die dem Ostracum der Länge nach anliegen.

3. Geologisches Vorkommen und Systematik. Die Scaphopoden umfassen langlebige und konservative Typen, die von ihrem ersten geologischen Auftreten bis zur Jetztzeit reichen. Die ältesten Formen sind aus dem Silur bekannt geworden. Von diesem Zeitpunkt an nimmt die Zahl der Arten und Gattungen ständig bis zur Tertiärzeit zu. Insgesamt sind etwa 180 fossile Arten bekannt geworden, die sich auf die beiden folgenden Familien verteilen.

a) Familie Dentaliidae Gray. Fuß kegelförmig mit zwei Seitenlappen. Schale kegelförmig, nach vorn sich gleichmäßig erweiternd. Mündung nicht eingeengt. Glatt oder berippt.

Im Kambrium sind sie bisher noch nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Im Silur erscheint ein einfacher Typus, das glatte und am Hinterrande ganzrandige Laevidentalium Cossm., das bis in die Jetztzeit hineinreicht. Zu dieser Gattung gehört wahrscheinlich auch das devonische Dentalium antiquum Goldf.; Plagioglypta Pils. u. Sharp. — mit schräg liegenden Zuwachsstreifen — ist im Karbon und in der Trias (Dentalium undulatum Mstr.) häufig. Neue Typen erscheinen in der Kreide mit Fustiaria Stol. — glatte oder geringelte Dentalien mit langem Schlitz — und Antalis Adams — längsberippte Formen mit kurzem Schlitz. Größer wird die Zahl der Gattungen im Tertiär: Dentalium s. str. — längsgerippt ohne Schlitz, seit dem Eocän; Fissidentalium Fisch. — längsberippte Formen mit langem Schlitz, seit dem Eocän.

b) Familie Siphonodentaliidae

Simroth. Fuß röhrenförmig ohne Seitenlappen. Schale glatt mit verengtem Vorderrande. Vorherrschen der Cadulustypen.

Diese Familie ist erst seit der Kreide bekannt mit Gadila Gray — Hinterrand ganzrandig. Im Tertiär treten eine Reihe weiterer Gattungen hinzu, die nach der Form des Hinterrandes unterschieden werden: Cadulus Phil — Gehäuse eiförmig, Hinterrand lappig; Dischides Jeffr. — mit einem ventralen und einem dorsalen Schlitz; Siphonodentalium Sars. — mit lappig eingeschnittenem Hinterrande aber schlanker Gestalt.

Literatur. *Siehe die Zusammenstellung in* ***K. v. Zittel,*** *Grundzüge der Paläontologie. I. Abteilung. Invertebrata. 3. Auflage.*

R. Wedekind.

Schacht

Hermann.

Geboren am 15. Juli 1814 in Ochsenwerder bei Hamburg. Er begab sich 1829 nach Altona, um die Pharmazie zu erlernen, welche er darauf in verschiedenen Städten ausübte. Von 1841 bis 1842 besuchte er die Universität Jena, wurde dort 1847 Assistent bei Schleiden, promovierte 1850, um darauf nach Berlin zu gehen, wo er sich 1853 habilitierte. Bald darauf trat er eine zweijährige Reise nach Madeira und den Canaren an. 1860 wurde er als Professor der Botanik und Direktor des Botanischen Gartens nach Bonn berufen, wo er am 20. August 1864 starb. Seine umfangreichen wissenschaftlichen Arbeiten brachten manchen Fortschritt, wie z. B. die richtige Erkenntnis der behöften Tüpfel im Holz; in anderen Punkten jedoch war er weniger glücklich, so verteidigte er z. B. die irrige alte Schleidensche Auffassung von der Befruchtung und Embryobildung der höheren Pflanzen usw. In weitere Kreise drangen sein „Mikroskop und seine Anwendung" (Berlin 1851), die „Physiologische Botanik" (ebenda 1852), „Der Baum. Studien über Bau und Leben der höheren Gewächse" (ebenda 1853, 2. Aufl. 1860), das „Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Gewächse" (Berlin 1856 bis 1859, 2. Aufl. der „Physiologischen Botanik") sowie der „Grundriß der Anatomie und Physiologie der Gewächse" (ebenda 1859).

Literatur. ***J. Groenland,*** *in Bulletin de la société botanique de France, Bd. 11, 1864, Revue Bibliographique, S. 235 bis 240.*

W. Ruhland.

Schädellehre und Skelettlehre.

A. Kraniologie: I. Technik. II. Kraniologische Ergebnisse. 1. Altersunterschiede. 2. Geschlechtsunterschiede. 3. Individual- und Gruppenunterschiede: a) Form einzelner Schädelabschnitte. b) Varianten an Einzelknochen. III. Anhang. Zähne. B. Skelettlehre. I. Technik. II. Ergebnisse.

Die Schädellehre oder „Kraniologie" ist ein Teil der gesamten Morphologie der Rassen (s. Bd. 8, S. 106). In dieser Rassenmorphologie bildet die Skelettlehre ein besonders umfängliches Kapitel, weil von keinerlei anthropologischem Material der wissenschaftlichen Bearbeitung so viel zuströmt wie vom Skelettsystem (sogar die Untersuchungen an Lebenden bleiben dahinter weit zurück). Und vom Skelett ist es wieder besonders der Schädel, der in Tausenden von Exemplaren die Sammlungen füllt. So kann es nicht verwundern, daß über den Schädel die größte anthropologische Literatur vorliegt, daß seine anthropologische Untersuchung, d. h. die Kraniologie, eigene Methoden ausgearbeitet hat. Aber nicht nur die Menge des Materiales hat das bewirkt, sondern auch der Umstand, daß der Menschenschädel einer der am stärksten spezifisch menschlich-differenzierten Teile ist, daher besondere Probleme enthält, auch bei der Rassendifferenzierung offenbar stark in Mitleidenschaft gezogen wurde, also auch für diese Fragen untersucht werden mußte.

So wurde die Kraniologie auch innerhalb der gesamten (anthropologischen) Skelettlehre besonders gepflegt und ausgearbeitet, in folgender kurzen Uebersicht (mehr kann es in diesem Rahmen nicht sein) sollen daher Kraniologie und übrige Skelettlehre getrennt, nacheinander behandelt werden.

A. Kraniologie.

I. Technik.

Schon eine flüchtige Vergleichung von Menschen- und Affenschädeln aber auch von Schädeln verschiedener Menschenrassen zeigt, daß in den gesamten Formverhältnissen wie in der Ausbildung einzelner Knochen und Knochenteile zahllose große und kleine Unterschiede sind, Größen und Formen wechseln aufs mannigfaltigste. Für eine genaue Erfassung dieser Differenzen oder gar für deren unzweideutige Wiedergabe erwies sich bald das beschreibende Wort sogar auch die einfache Abbildung als ungenügend; die Angabe z. B., daß eine Schädelkapsel etwas länglicher und zugleich schmaler sei wie eine andere, ist schon beim Vergleich zweier solcher nicht genau genug, beim Vergleich ganzer Reihen von Hunderten aber völlig versagend.

Da mußte die Messung, die Bestimmung von Ziffernwerten für die Unterschiede eingeführt werden, neben die beschreibende Methode, die „Kranioskopie", trat die messende, die „Kraniometrie". Beide müssen sich ergänzen und keine kann für sich allein

zu brauchbaren Ergebnissen führen. Insbesondere muß betont werden, daß das Messen ausschließlich den Zweck hat — und keinen anderen haben kann und darf — Form- und Größenunterschiede, die der Morphologe sieht, so auszudrücken und präzis zu fassen, daß das subjektive Moment des Schätzens ausgeschlossen und ein exakter Vergleich möglich ist. So darf also nur nach morphologischen Gesichtspunkten gemessen werden; jedes Maß muß eine morphologische Bedeutung haben. Man hat dagegen oft gesündigt, den Schädel sozusagen als mathematischen Körper aufgefaßt und die Entfernungen zwischen allen möglichen, sich irgendwie markierenden Punkten bestimmt. Solches Messen um des Messens willen — Hunderte von Maßen an einem Schädel — ist als gänzlich unwissenschaftlich und wertlos zu bezeichnen — es ist auch heute wohl endgültig verlassen. Man hat übrigens gelegentlich als Reaktion auf diese unsinnige Messerei von einem Zusammenbruch der messenden Methoden, ihrer gänzlichen Ergebnislosigkeit gesprochen — eine Uebertreibung und Verleumdung aus Unkenntnis oder unbilliger Abneigung. — Ein Blick auf die Schwalbeschen „Messungen" am Neandertalschädel und die darauf beruhende Aufstellung einer Diagnose dieses Objektes (s. Bd. IV, S. 343) zeigt den bleibenden Wert. — Aber wie die Wahl der Maße nur vom Morphologen geschehen kann, so kann der Laie auch übernommene Maße nicht richtig verwerten, aber man sieht viele solche etwa die Schädellänge und -breite messen und darauf „Rassen" annehmen und Theorien bauen. Es braucht kaum betont werden, daß menschliche Rassen bezüglich eines morphologisch so außerordentlich komplizierten Gebildes wie es der Schädel ist, nicht etwa in 1 oder 2 Punkten voneinander abweichen, daß an solchem Gebilde nicht eine Dimension oder Form an irgendeiner Stelle abänderbar ist, ohne daß andere Teile in Mitleidenschaft gezogen werden. In jedem Falle ist also eine Schädeluntersuchung eine morphologische Arbeit und der Maßstab ausschließlich eines der Ausdrucksmittel der Ergebnisse. Folglich kann auch nie festgelegt werden, was und wie gemessen werden soll. Es muß stets versucht werden, die für den betreffenden Fall oder Zweck charakteristischen Merkmale irgendwie ziffernmäßig zu fassen — da ist also vollkommen freies Feld gegeben. Trotzdem gibt es mit vollem Recht sogenannte kraniometrische Vereinbarungen (Vorschläge, Vorschriften). Sie stellen eine Art von Niederschlag dar aus den Erfahrungen, die zahlreiche Autoren bei morphologischen Untersuchungen über Rasseschädel schon gesammelt haben; es hat sich gezeigt, daß eine Reihe bestimmter morphologischer Merkmale besonders oft als Rassenunterschiede auftreten, daß man diese auf bestimmte Art am besten metrisch fassen kann: Eine Menge Vergleichsmessungen nach diesen Methoden liegen vor, einem künftigen Arbeiter auf gleichem Felde erleichtert das Befolgen derselben Methode seine künftige Arbeit: so sind solche Vorschriften außerordentlich nützlich, es ist zu wünschen, daß Bearbeitungen größerer Schädelserien ihnen folgen, wobei es ja jedem Autor nicht nur frei steht, sondern wohl wissenschaftliche Pflicht ist, etwaige besondere Formeigenheiten durch besondere Maße auszudrücken, die sich zu denen des Reglements dazugesellen. Abgeschlossen kann und darf ein solches Maßschema nie sein, es bedarf hier und da der Reorganisation. So trat in der Tat kürzlich eine neue Uebereinkunft an Stelle der älteren. Von solchen seien hier genannt: P. Broca „Instructions craniologiques et craniométriques de la Société d'anthropologie", (Paris 1875), dann die sogenannte „Frankfurter Verständigung", die in Deutschland maßgebend wurde (Arch. Anthr. 15, 1884). Im Jahre 1906 tagte in Monako eine internationale Kommission, die eine neue Anleitung zur Kraniometrie herausgab (s. v. Luschan 1906). — Eine neuere ausführliche lehrbuchmäßige Darstellung dieses ganzen Gebietes fehlt, R. Martin bereitet eine solche vor, auf die hier nachdrücklichst hingewiesen werden soll (Jena 1913 oder 1914). Von älteren Werken sind zu nennen vor allem E. Schmidts gute, kleine „Anleitung" (1888), dann die Anleitung v. Luschans (1905), die sehr umfangreiche und viele unnötigen Maße bearbeitende „Kraniometrie" v. Töröks (1890), die „Anthropologien" Frassettos (1911), Rankes (1912), Topinards (1885). Eine „Anleitung", wie nun im einzelnen die Messungen auszuführen sind und welche, oder auch nur eine genauere Beschreibung der Methoden, kann hier natürlich auf keine Weise gegeben werden, dafür sei auf die eben erwähnten Werke hingewiesen; nur eine kurze Uebersicht, des wichtigsten von dem, was überhaupt beabsichtigt und erstrebt wurde, sei in großen Strichen gegeben.

Meßbar sind 1) Strecken, also z. B. die Länge eines Schädels, oder die Breite des Gesichtes oder die Höhe des Augenhöhleneinganges usw., aber auch gekrümmte, etwa die Länge einer Naht usw.; 2) Winkel, die solche Strecken miteinander bilden, z. B. der Winkel zwischen den queren Achsen beider Augenhöhleneingangsebenen oder verschiedene Winkel zwischen „Profillinien" und „Schädelhorizontallinien" (s. Fig. 1). Die Kombination von Strecken- und Winkelmessung, vor allem an Umrißkurven, die vom Schädel in mehreren Richtungen ge-

nommen werden, führte zur Untersuchung von Dreiecken, die man in den Schädel von morphologisch bedeutsamen Punkten aus konstruieren kann; man hat dann diese Untersuchung „Kraniotrigonometrie" genannt (Klaatsch 1909, v. Török [l. c.] u. a.); 3) Flächen, — es wird ihr Inhalt bestimmt, z. B. die Flächengröße des Augenhöhleneinganges oder des großen Hinterhauptloches oder bestimmter Teile der Schädelwölbung usw.; 4) der Rauminhalt, z. B. der Augenhöhle, vor allem aber der Rauminhalt des Gehirnschädels (s. unten) — endlich 5) das Gewicht von Schädeln oder einzelnen Teilen.

Eine Reihe von Formverschiedenheiten sieht man viel besser an einer in bestimmter, jene eben hervortreten lassender Weise angelegten Umrißkurve des Schädels als an diesem selber, und auch eine Anzahl Messungen sind an solchen „Kurven", „Zeichnungen" leichter zu nehmen als am Original, so hat sich eine besondere Technik zu deren Herstellung entwickelt (s. unten), man spricht gelegentlich von „Kraniographie".

Zur Vornahme der Messungen hat man besondere Instrumente (Meßinstrumente), deren Handhabung einige Uebung („Meßtechnik") verlangt. Eine Reihe von Autoren haben solche Instrumente angegeben oder vorhandene abgeändert oder verbessert. Broca, Virchow, Hölder, Ranke u. A., Flower und die englische Schule, Tedeschi u. A. haben je ihre Instrumente; in neuester Zeit sind wohl die verbreitetsten — vor allem in Deutschland, aber auch in Italien, England und Amerika — die des (emeritierten) Züricher Anthropologen R. Martin (hergestellt von Hermann, feinmechanische Werkstätte Zürich). — Zu allen größeren Streckenmaßen benutzt man den „Tasterzirkel"; das ist ein Zirkel mit bogenförmig (halbkreis- oder oval) gekrümmten Armen, geeignet, den Schädel z. B. von der Stirn nach dem Hinterhaupt zu umspannen. Entweder kann man dabei an einer Skala, die von einem Arm zum anderen zieht, direkt die Entfernung der Zirkelspitzen in jeder Lage ablesen (s. Martin (1903) oder man überträgt den Zirkel in der gefundenen Oeffnungsweite auf einen gewöhnlichen Maßstab und mißt hier den Abstand der Zirkelspitzen. — Kleinere Maße, z. B. Breite der knöchernen Nasenöffnung und viele andere, mißt man mit einem sogenannten Gleitzirkel oder Stangenzirkel (Compas glissière der Franzosen). Zu speziellen Zwecken hat man dann eine Menge Einzelinstrumente, zum Teil je für einen bestimmten Fall eigens konstruiert; z. B zur Messung der Augenhöhlentiefe ein Stäbchen mit Schieber und Skala, zur Messung von Bögen Mollisons (1907) „Zyklometer" u. a. m.

Zur Messung von Winkeln wurden eine ganze Reihe „Goniometer" angegeben, so z. B. der Rankesche (s. Ranke 1912), der von Martin (1903), von Mollison (1907). — Fürst (1906) gibt ein Instrument zur Berechnung von Winkeln, die man nicht direkt messen kann. Speziell für Winkelmessungen am Unterkiefer haben v. Török (1890), Broca, Hambruch (Korresp.-Bl. 1907) Instrumente angegeben. — Sehr unregelmäßig verlaufende Linien, z. B. gezackte Schädelnähte, kann man mit dem „Meßrädchen" messen oder mit Faden auslegen und dann die Länge des dazu verbrauchten Fadens messen; die Länge einfacher Bogen (Stirnbogen, Scheitelbogen usw.) oder Umfänge (Schädel-Horizontalumfang usw.) mißt man mit gutem (nicht ziehbarem, am besten metallenem) „Bandmaß". — Auch Anlegen von biegsamem Draht zur Bestimmung von Kurven wird geübt (v. Bälz u. a.). — Bei allen Instrumenten kommt es natürlich auf die Güte der Ausführung an, das Instrument muß genau messen. Der Messende muß die Technik völlig beherrschen, Exaktheit ist die erste Anforderung. Aber man muß sich auch der Fehlergrenzen bewußt sein, eine mathematische Genauigkeit hat die Kraniometrie nicht. Die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit wird den Schädel etwas beeinflussen (wie einmal Broca nachwies, die Schädellänge um mehr als $^1/_2$ mm). Bruchteile von Millimetern wird man bei den größeren Maßen (Länge, Breite, Höhe von Schädel und Gesicht) vernachlässigen dürfen; handelt es sich um absolut sehr kleine Maße (kleine Strecken an kleinen Affenschädeln), wird man feinere Instrumente, mit Noniusablesung benutzen müssen; jedenfalls muß man seine Fehlergrenzen kennen, Angaben von Einzelmaßen größerer Strecken mit Zehntelmillimetern sind nur scheinbar exakt, die Bruchteile völlig wertlos.

Flächeninhalte werden an der Zeichnung auf Millimeterpapier berechnet, oder am Objekt durch Belegen mit Staniolpapier bestimmt oder an Zeichnung oder Objekt mit dem kleinen Planimeterapparat bestimmt (ein kleiner Apparat, den die Geodäsie u. a. benutzen).

Vielfach ausgearbeitet sind Methoden zur Bestimmung des Schädelinhaltes, der sogenannten „Kubierung" des Schädels. Wegen seiner Löcher und der Porosität der Knochen läßt sich der Schädel nicht mit Wasser füllen und so eichen. Man hat ganz dünne, sich der Schädelinnenwand möglichst anschmiegende Gummiblasen benutzt und dann mit Wasser gemessen, meist aber benutzt man zum Messen feste Füllmassen, und zwar Hirse, Erbsen, Bleischrot, Glasperlen bestimmter Korngröße, Sand usw. Man muß in besonderer Weise durch Stopfen und Schütteln eine stets

gleiche Füllung herbeiführen und bestimmt dann die Menge des Füllmaterials (durch Wägen oder) durch Messung in einem Hohlmaß, wobei wieder für entsprechendes gleichmäßiges Zusammensitzen der betreffenden Körner gesorgt werden muß. Zur Prüfung der Methode ist ein „Crâne étalon", ein Probeschädel unentbehrlich; Broca hat einen solchen in genauer Nachbildung aus Bronzeguß herstellen lassen, man kann ihn auch aus einem natürlichen Schädel herstellen (s. Schmidt [1888]). — Die Fehlergrenzen dieser Methode sind natürlich viel weitere wie bei Messungen, sie werden mehrere Kubikzentimeter betragen, je nach der Methode. — Man kann den Inhalt auch bestimmen, indem man einen Gipsausguß herstellt und diesen kalibriert (Wasserverdrängung). Endlich hat man (rein empirisch) den Inhalt aus Außenmaßen (Höhe, Länge, Breite, Umfänge usw.) berechnet (s. z. B. Froriep 1910).

Die Herstellung von Schädelkurven, also Umrisse in den verschiedensten Richtungen, geschieht heute fast nur noch mit den neueren „Diagraphen", die auf die älteren Modelle von Lucae, Lissauer, Rieger u. A. zurückgehen. Man benutzt teils den „Dioptrographen", den Martin mit einem Storchschnabel verband (s. Martin 1903) — vor allem aber den Lissauerschen „Diagraphen" in den Modifikationen nach Klaatsch (1902) oder Martin (1903) oder Wetzel (1911), auch „Perigraph" genannt (genaueres s. bei Schlaginhaufen [1907 und 1912] und Wetzel [l. c.]). Bei all diesen Methoden wird ein Zeiger um den in bestimmter Lage fixierten Schädel in bestimmter Ebene herumgeführt, und ein Zeichenstift zeichnet die entsprechende Kurve auf. Solche Kurven haben sich von außerordentlicher Wichtigkeit erwiesen (vgl. den Artikel „Fossile Hominiden", Bd. IV S. 345), sie sind zur Untersuchung allgemeiner morphologischer Verhältnisse und von Rassenunterschieden vielfach benutzt worden (Rieger, Lissauer, Sarrasin, Schwalbe, Klaatsch, Falkenburger u. A.). Was für Kurven man wählt, kommt auf die besonderen Zwecke an; allgemeinere Vorschläge sind nicht gemacht oder nicht allgemeiner angenommen. Am verbreitetsten für allgemeine Zwecke sind die Sarrasinschen Kurven (4 horizontale und je 3 frontale und sagittale). Reichlich hat Klaatsch von Kurven Gebrauch gemacht, ebenso Schwalbe (s. Bd. IV, S. 359).

Zur vorhin erwähnten Aufstellung des Schädels in bestimmter Lage bedarf es ebenfalls besonderer Instrumente — aber nicht nur hier ist solche Aufstellung nötig: Wenn man eine Reihe von Schädeln miteinander vergleichen will, müssen sie sich in gleicher Lage befinden. Solche Schädelansichten, die Flächen, die der Schädel dem Beobachter von vorn, hinten, oben, unten, seitlich (und aufgesägt, von der Mitte her) bietet, nennt man „Normen", „Schädelnormen" und spricht (in obiger Reihenfolge) von Norma frontalis, occipitalis, verticalis, basilaris, lateralis (und mediana). Um mehrere Schädel in je gleiche Normen zu bringen, müssen sie also gleich aufgestellt sein, d. h. entsprechende Punkte müssen je in entsprechenden „Ebenen" liegen. Natürlich gegeben ist nur die „Medianebene", die Symmetrieebene des Schädels also; die anderen sind konstruiert, und zwar in sehr großer Zahl. Heute kommen für allgemeine Zwecke wohl 2 „Horizontalebenen" in Betracht, die „Frankfurter Horizontale" (= deutsche Horizontalebene) und die französische Horizontale, der „plan alvéolo-condylien". Diese letztere ist bestimmt durch die prominentesten Punkte beider Condylen und den Oberkiefer-Alveolarrand zwischen den mittleren Schneidezähnen. Die Ebene ist an sich sehr gut, erlaubt aber keinen Vergleich von Schädel und lebendem Kopf. Die deutsche Ebene (s. Abb. 1) ist bestimmt durch die tiefsten Punkte der unteren Augenhöhlenränder und den senkrecht über der Mitte der rechten Ohröffnung liegenden Punkt des Oberrandes des knöchernen Gehörganges (wenn der Schädel völlig symmetrisch wäre, würde man natürlich beiderseits den Ohrpunkt nehmen).

Sie ist vom morphologischen Standpunkt aus recht schlecht gewählt, weil sie Punkte vom Hirn- mit solchen vom Gesichtsschädel verbindet und benutzt; trotzdem ist sie die verbreitetste.

In dieser oder senkrecht auf diese Ebene betrachtet man die Normen (damit ist hier schon auf die Kranioskopie vorgegriffen) und stellt man Abbildungen (Photographien) oder Kurven her. Dagegen sind Projektionsmessungen, also Messungen derart, daß statt des direkten Maßes dessen Projektion auf eine der „Ebenen" genommen wird, so gut wie ganz aufgegeben worden (man hat früher eine „gerade Schädellänge", d. h. die wirkliche Länge in ihrer Projektion auf die deutsche Horizontale genommen und einige andere Maße der Art). — So haben diese Ebenen, auch speziell die „deutsche", für die Kraniometrie nur noch sehr geringen Wert. Dagegen ist es nötig, für bestimmte Untersuchungen — vor allem an Kurven — bestimmte Ebenen auszuwählen. Da sei die Riegersche erwähnt, vor allem aber die von Schwalbe zur Untersuchung fossiler Hominiden benutzte „Glabella-Inion"- und „Nasion-Inion"-Ebene und die von Klaatsch zum selben Zweck gebrauchte „Glabella-Lambda"-Ebene (s. Bd. IV, S. 359). Es

ist ganz natürlich, daß man zu solchen speziellen Zwecken je eine spezielle Ebene gebrauchte — und sie haben sehr schöne Ergebnisse gehabt —, eine allgemeine brauchbare Ebene gibt es überhaupt nicht, so daß da jeder Streit praktisch wertlos ist.

Zur Aufstellung des Schädels (überhaupt und speziell in bestimmten Ebenen) dienen „Kraniophore“, „Schädelhalter“, deren eine große Menge angegeben sind, ganz einfache und äußerst komplizierte. Von einfachen seien genannt der von Präparator Seyfert (Anatomisches Institut Berlin) in den Handel gebrachte, der von Martin (1903), der von Mollison (1907). Die sehr komplizierten von Broca, Lucae, Ranke, v. Török sind durch die einfacheren verdrängt. Zur Herstellung mancher Kurvensysteme bedarf man Schädelhalter, die den Schädel rasch und genau um 90° oder 180° drehen lassen. Da ist der „Kubuskraniophor“ Martins (1903) mit Abänderung von Schlaginhaufen (1912) zu nennen. Der Schädel sitzt unbeweglich im Zentrum eines großen aus Metallkanten bestehenden Würfelgestelles, welches sich natürlich auf alle Seiten legen läßt, so daß der Schädel dadurch je um 90° gedreht wird. Da die Stäbe des Würfels doch das Herumführen des Diagraphenapparates (der samt dem Würfel auf einer eben polierten Marmorplatte ruht) recht stört, hat Stolyhwo (1910) einen galgenförmigen „Osteophor-Projektiometer“ angegeben, dessen Endstück, der eigentliche Schädelhalter, in dem wagrechten Galgenarm je um bestimmte Grade gedreht werden kann. Endlich hat Wetzel (1911) wohl den besten derartigen Kraniophor (und Osteophor) gebaut, auf dem Prinzip des Doppelgalgens.

Auf die Wichtigkeit der Photographie kann hier nur hingewiesen, auf deren Technik aber auf keine Weise eingegangen werden.

Nach Erörterung der prinzipiellen Technik müssen nun die zu nehmenden Maße noch kurz genannt werden. Wie oben erwähnt, wird man zu Spezialzwecken stets seine eigenen neuen Maße einfügen müssen, die stets — aber auch nur — berechtigt sind, wenn sie eine erkannte Formeigentümlichkeit erstmals oder präziser als ältere ausdrücken. Wie oben angegeben, hat man aber auch nach langer Erfahrung als wichtig erkannte Maße festgelegt. Deren Meßpunkte sind also bestimmte. Außer auf die „Vereinbarungen“ (s. oben) sei auf ein sehr gutes von Martin u. a. herausgegebenes „Meßblatt“ hingewiesen, ein Formular mit den vorgedruckten Maßen zum Eintragen der Personalien und der metrischen und deskriptiven Merkmale je eines Schädels (Anthropologisches Institut Zürich). Zur kurzen Bezeichnung solcher wichtigen Meßpunkte hat man außer einigen der Schädelanatomie des Mediziners entlehnten Namen für eine Reihe Punkte neue Namen eingeführt (v. Török zählt gegen 100 auf!). Deren wichtigste (und oft gebrauchte) sind etwa folgende (s. Fig. 1

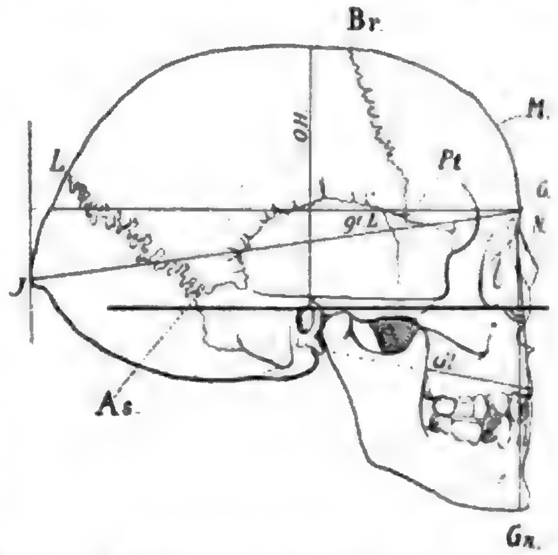


Fig. 1. Dolichocephaler Schädel in der „Deutschen Horizontalen“ (dicker Strich). Norma lateralis. N-Gn Gesichtshöhe, Gl Profillänge, OH Ohrhöhe, gr. L größte Länge. Der Profilwinkel ist doppelt angestrichen. — Aus Schmidt (1888).

und 3). In der Symmetrieebene gelegen, Schnittpunkte dieser Ebene mit folgenden Schädelteilen: vorderer Rand des Foramen magnum: Basion; hinterer Rand desselben: Opisthion; protuberantia occipitalis externa: Inion (I.); hinteres Ende der Sagittalnaht: Lambda (L.); vorderes: Bregma (Br.); Querlinie zwischen beiden Stirnhöckern: Metopion (M.); Stirnwulst über der Nasenwurzel: Glabella (G.); Stirnnasennaht: Nasion (N.). Dann seitlich am Schädel (also paarig): Asterion (As.): Treffpunkt von Lambdanaht, Temporo-parietal- und Temporo-occipitalnaht; Pterion (Pt.): vorderste obere Spitze des großen Keilbeinflügels; Stephanion (St.): Kreuzungspunkt von Schläfenlinie und Coronarnaht. Es sind noch viel mehr solche Punkte im Gebrauch, doch muß dafür auf Topinard, v. Török, E. Schmidt u. a. verwiesen werden (l. c.).

Die Maße, die man mit den oben angedeuteten Methoden und Instrumenten erhält, bedürfen zu ihrer Vergleichbarkeit einer eingehenden rechnerischen Bearbeitung. Zunächst sind absolute Werte zur Vergleichung höchst ungeeignet: das zeige ein Beispiel: ein nach der Messung sehr niederer Schädel, also einer mit einer Schädelwölbungshöhe von wenigen Zentimetern, könnte leicht als primitiv in diesem Punkt gehalten werden, da auch Affenschädel nicht hochgewölbt sind; ist aber nun ein solcher Schädel zu-

gleich sehr schmal und sehr kurz, so kann er tatsächlich doch verhältnismäßig sehr gut gewölbt, geradezu hochgewölbt sein, trotz der absolut geringen Zentimeterzahl dieser Höhe: er ist dann eben im ganzen sehr klein, dabei also „verhältnismäßig" hoch, „absolut" nieder: Auf die „Verhältnis"zahlen kommt es also an.

Die Einführung solcher Verhältniszahlen in die Anthropologie geht auf Anders Retzius zurück, der 1840 die Schädellänge im Verhältnis zur Schädelbreite ausdrückte, wobei er erstere zu 1000 ansetzte; er führte damit den „Index"-begriff ein; er unterschied dann auch gleich einzelne Kategorien, mit niederem und hohem Index, lange und runde und benannte sie mit Kunstworten (s. unten). Daß Retzius mit seiner neuen Methode in seiner Heimat zwei auch durch andere anthropologische und durch ethnische Merkmale scharf geschiedene menschliche Gruppen — Schweden und Lappen — unterscheiden konnte, verhalf ihr sofort zu größtem Ansehen, zumal die Methode so einfach schien, auch von Laien anwendbar (!) im Gegensatz zu Blumenbachs anatomischer Schädeluntersuchung.

Selbstverständlich wurde und wird noch oft die Methode überschätzt und ihr Prinzip übertrieben; man glaubte, in den begrifflichen Kategorien „Langschädel" usw. wirkliche zoologische Einheiten zu haben. — Von solchen Auswüchsen abgesehen ist die Benutzung von Indices nützlich, ja unentbehrlich (s. unten). Man darf Anders Retzius dauernd dankbar sein und seine scharfsinnige Arbeit bewundern. Er hat in damals recht verworrene Dinge Ordnung gebracht — seine Schuld ist es nicht, wenn man gelegentlich im Messen und noch mehr im Einteilen in den Bann von Schablonen geriet und sozusagen mit hübsch etikettierten Systemen zufrieden war und ist, statt Morphologie und vor allem Biologie zu treiben!

Man vergleicht also nicht absolute Schädelmaße, sondern drückt je ein Maß in Prozenten eines zugehörigen aus, so z. B. die Schädelbreite in Prozenten der Länge; der Wert wird dann „Längenbreitenindex" oder als der am häufigsten benutzte Index kurzweg „Schädelindex" genannt; ebenso hat man Längenhöhenindex usw.; dann sind natürlich entsprechende Indices für alle anderen Streckenmaße da, also z. B. ein Nasenindex, der die Breite des knöchernen Naseneinganges in Prozenten der Länge der Nase angibt; ein Längenbreitenindex des Gesichtes usw. — Erfahrungen über die wirklich vorkommenden Werte der einzelnen Indices lassen diese dann gruppieren in hohe, mittlere und niedere Indices. Ein hoher Index zeigt natürlich stets an, daß das verglichene Maß beinahe gleich, ganz gleich oder größer ist wie das andere (Index 100 zeigt natürlich die Gleichheit an: 100%).

Für die so einteilbaren Kategorien hat man besondere Namen eingeführt und die Grenzen, bis zu welchen man die Werte einer Kategorie (schmale, runde usw.) zuzählt (willkürlich), durch Abmachung festgelegt (s. unten). — Die Berechnung der Indices kann durch Benutzung von Tabellen („Indextabellen"), vor allem die von Fürst (1902), erspart werden; Poniatowski (Archiv für Anthropologie, 10, 1911) zeigt, daß bei unserem gewöhnlichen Messen die Stellen nach dem Komma beim Index vernachlässigt werden können und müssen. — Die Meß- und Indexergebnisse müssen dann weiter nach den statistischen Methoden bearbeitet werden, es müssen je für eine Serie Mittelwert, Grenzwerte, stetige Abweichung und je deren wahrscheinliche Fehler u. a. berechnet werden. Es gibt dazu besondere Anleitungen, besonders hat die englische Schule unter Pearsons Leitung (s. die Zeitschrift „Biometrica", London) viele theoretische Arbeit dazu geliefert (vgl. Davenport 1904). Zur Aehnlichkeitsvergleichung ganzer Reihen dient Mollisons „Typendifferenz" (s. Poniatowski, l. c.). Hier sei endlich noch erwähnt, daß die von der deutschen anthropologischen Gesellschaft veranlaßten Kataloge der Schädelsammlungen Deutschlands (Supplemente zum Archiv für Anthropologie) für die darin aufgeführten Schädel je die wichtigsten Maße angeben — ein ungeheueres Material!

Als vollkommen gleichberechtigte, ja sogar tatsächlich als stets zuerst auszuübende Methode tritt neben die Messung die beschreibende Feststellung der Formen des Schädels und seiner Teile, die „Kranioskopie" — soll doch, wie erwähnt, der Maßstab nur in Ziffern legen, was vorher an Merkmalen gesehen ist. Die Beschreibung wird am häufigsten nach den einzelnen „Normen" vorgenommen. Sie erfolgt wie jede entsprechende in allen biologischen Disziplinen. Für einzelne Merkmale kann man Variationstypen aufstellen, etwa nach Kompliziertheit oder Zahl von Einzelheiten oder dergleichen sich steigernde Schemas, so daß dann die Schätzung der im Einzelfall vorliegenden Form erleichtert wird (z. B. für Schädelnähte).

Eine Anzahl Autoren, vor allem Italiener, wollen fast ausschließlich die Beschreibung gelten lassen, lassen dabei die Messung sehr zurücktreten; sie nennen ihre Methode die „zoologische". Sergi hat sie am konsequentesten ausgebaut. Die Gesamtform, die dem Beobachter der Schädel liefert, wird dabei nach ihrer Aehnlichkeit mit mathematischen Körpern (Kugel, Ellipse, Keil usw.) benannt, so daß eine Menge Fachausdrücke eingeführt wurden (s. z. B. Ranke 1894, II, S. 231). So unterscheidet Sergi (1905) z. B. in der Ansicht von oben einen „Ellipsoides" und einen „Sphaeroides". Ersterer zerfällt, je nachdem die Höcker fehlen oder stark ausgebildet sind, in einen „Ovoides"

und „Pentagonoides“. Und der Sphaeroides zerfällt, je nachdem das Hinterhaupt in der Norma lateralis fersenartig (sphen) vortritt, oder flach ist, in einen „Sphenoides“ und einen „Platycephalus“. All diese und andere Formen kommen bei allen Gruppen vor.

Eine allgemeine Anerkennung hat die Methode nicht erlangt.

II. Kraniologische Ergebnisse.

Die Resultate der kraniologischen Untersuchungen sind zu einer fast unübersehbaren Literatur angewachsen; grundlegende Untersuchungen über Schädelwachstum, über die stammesgeschichtliche und individuelle Ausgestaltung einzelner Schädelteile, kasuistische Mitteilungen über Hunderte von Einzelvariationen, zahllose Beschreibungen rassenmäßiger Unterschiede, Angaben über pathologische Verhältnisse, all das läßt sich kaum mehr überschauen. Die folgende Uebersicht soll ganz kurz den Stand der Kenntnisse über die allgemeinen Formverhältnisse des Schädels und die Unterschiede der Formen, und über die Einzelvariationen der einzelnen Knochen und ihrer Teile skizzieren (es sei bezüglich der Literatur auf das Kapitel „Anthropologie“ in Schwalbes „Jahresberichte über die Fortschritte in Anatomie und Entwickelungsgeschichte“ (Jena) hingewiesen).

1. Altersunterschiede. Wohl keine Formenunterschiede am menschlichen Schädel sind so groß wie die der verschiedenen Lebensalter. Die Umbildung der Schädelform des Kindes zur erwachsenen und dann von dieser zur senilen ist außerordentlich stark und eingreifend. Die Gesamtform des Gehirnschädels wird zunächst durch den Geburtsakt beeinflußt, aber diese Deformierung gleicht sich normalerweise in den ersten Lebenstagen wieder aus. Einflüsse auf die Kopfform mag es dann mancherlei geben, sie werden wohl in den ersten Lebensmonaten kleinere Abänderungen bewirken (s. Bd. VIII, S. 84), aber im ganzen vererbt sich wohl zumeist die elterliche Form unbeeinflußt (Untersuchungen hierüber wären dringend erwünscht). Von starken „künstlichen“ Deformierungen ist dabei abgesehen (s. unten). Die betreffende Rassenform ist von Anfang an gegeben, aber sozusagen in stark gemilderter Form; Langschädel sind bei der Geburt schon solche und Kurzschädel neigen zu stärkerer Rundung und Kürze, wenn sie wohl auch bei extrem rundköpfigen Rassen lange nicht so stark rund sind als bei Erwachsenen; indes scheinen genauere Untersuchungen darüber zu fehlen. Dagegen sind innerhalb der betreffenden Gesamtform die Einzelheiten noch different; beim Kinderschädel sind die Stirn- und Scheitelhöcker stark prominent, ein Kopf, der in der Scheitelansicht später eiförmig wird, kann am Säugling fast fünfeckig sein (Sergi, l. c.). Der Längenbreitenindex scheint ganz frühe (nach Pfitzner [Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie 1899] vom 1. Jahre an) seinen endgültigen Wert anzunehmen, der Hirnschädel verändert dann also nicht mehr das Verhältnis der beiden Hauptdurchmesser, wohl aber Größe und Einzelheiten der Form. Viel mehr aber ändert sich das Gesichtsskelett. Es ist beim Kind relativ viel kleiner als beim Erwachsenen (s. Fig. 2), wie Stratz ganz hübsch

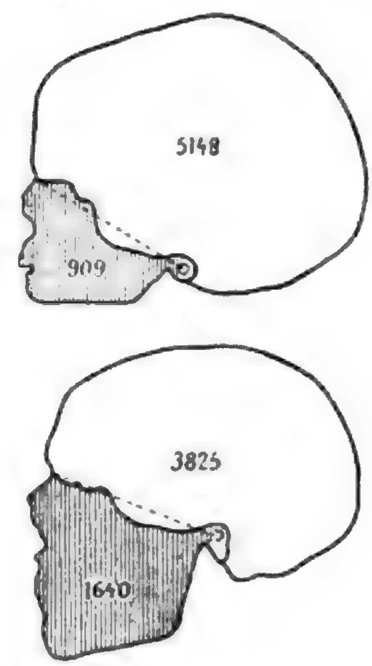


Fig. 2. Verhältnis der Flächenprojektionen von Gehirn und Gesichtsschädel bei Neugeborenen und Erwachsenen. Nach Stratz (1904).

anschaulich macht, auch wenn die Methode nur demonstriert, nicht Morphologisches bringt. Schon P. Camper wußte (1791), wie stark das Gesicht sich verändern muß. Der unterste Kieferabschnitt hat am stärksten zu wachsen. Der Unterkiefer hat noch fast keinen aufsteigenden Ast, dessen kleine Anlage sieht viel mehr nach rückwärts. Etwaige Prognathie (s. unten) bildet sich später erst aus (Details über prognathe Rassen sind nicht bekannt). — Auf die Einzelheiten kann — zumal sie mehr anatomisch als eigentlich anthropologisch sind — nicht eingegangen werden (man vergleiche die Lehrbücher der Anatomie und Entwickelungsgeschichte). Wie der Zug der Kaumuskeln das Gesichtsskelett formen hilft haben besonders Engel (1850) und Langer (1870) ausgearbeitet. — Selenka (1898) zeigt am Orangschädel. wie ein Gebilde, hier der fast dauernd wachsende Eckzahn mit seiner riesigen Wurzel, das ganze Kiefergebiet abändert, dadurch aber der großen Kaumuskeln wegen auch auf dem

Scheitel Knochenkämme erzeugt, worauf wegen der dabei erworbenen Schwere des Kopfes wieder die Nackenmuskeln sich große Ursprungsfelder am Schädel suchen müssen, das Hinterhaupt transformierend — ein glänzendes Beispiel für die funktionelle Umgestaltung des jugendlichen zum reifen Schädel. Beim Menschen ist der Wachstumsprozeß allerdings lange nicht so intensiv. — Wie dann die Nähte verknöchern, wird unten noch erörtert. — Eine Zeit völliger Ruhe gibt es für den Schädel nicht. Ehe die Wachstums- und Ausbildungsprozesse an einzelnen Stellen fertig sind, beginnt an anderen die Rückbildung, die Seneszenz. Einzelne Nähte veröden, chemischer und morphologischer Aufbau der Knochen ändern sich. — Der greisenhafte Schädel zeigt eine größere Flachheit des Schädeldaches, bedingt durch Schwund der inneren Knochenschicht (Diploe), Verdünnung aller Knochen. Am stärksten ist auch hier das Gesicht verändert durch Schwund der Alveolarteile an Ober- und Unterkiefer (infolge des Zahnschwundes). Das Gesicht wird viel niedriger, der Unterkiefer (das Kinn) tritt stark vor, der aufsteigende Ast schaut mehr nach rückwärts (vgl. die Anatomie-Lehrbücher).

2. Geschlechtsunterschiede. Geschlechtsunterschiede sind am Schädel ebenfalls vorhanden. Man kennt eine ganze Reihe Merkmale, die für den männlichen, und andere, die für den weiblichen Schädel charakteristisch sind. Stets aber handelt es sich nur um ein Mehr oder Weniger des betreffenden Merkmales, qualitative Unterschiede, die z. B. bei manchen Anthropoiden in Knochenkämmen bestehen, fehlen beim Menschen. Sind mehrere der betreffenden Merkmale deutlich ausgeprägt, so kann man mit Sicherheit die Diagnose des Geschlechtes stellen, aber bei allen Rassen gibt es auch Schädel, die jene nicht zeigen, oder die gar männliche und weibliche Merkmale gemischt tragen, die also nicht diagnostizierbar sind. Bartels (1897) gibt eine sehr gute Zusammenstellung dieser Geschlechtsmerkmale. Danach ist der männliche Schädel größer, schwerer, dagegen ist die Form, also z. B. der Längenbreitenindex an sich nicht verschieden; das männliche Gebiß ist stärker, der Unterkieferwinkel steiler, der Zahnbogen breiter und runder, Glabella und Superciliarbogen sind stärker ausgebildet; dann gibt es eine Menge Merkmale, die wenigstens öfters bei einem Geschlecht vorkommen wie beim anderen, deren Häufung also diagnostisch verwertet werden kann; so neigt der weibliche Schädel mehr zu alveolärer Prognathie, hat relativ größere Augenhöhlen, stärkere Entwickelung von Stirn- und Scheitelhöckern, senkrechtere Stirn u. a. (jedenfalls muß bei Schädeluntersuchungen stets angegeben werden, ob das Geschlecht bekannt ist oder nur diagnostiziert wurde).

3. Individuelle und Gruppenunterschiede. Abgesehen von Alters- und Geschlechtsmerkmalen findet man nun eine geradezu verwirrende Variabilität der Gesamtformen des Schädels, also des Hirnschädels nach Länge, Breite, Höhe, Form des Gesichtsschädels und seiner einzelnen Teile, Augen- und Nasenhöhle und Gaumen. Die Unterschiede, die man da sieht und mißt, sind zum Teil rein individuelle. Je ein Einzelindividuum kann einen kurzen, hohen, steilgewölbten Schädel haben, oder einen flachen, langen, schmalen; aber flach, lang, schmal kann der Schädel auch bei einer größeren Gruppe von Menschen sein; dort hätten wir dann rein individuelle, hier rassenmäßige Bildung; der Entscheid fällt da oft schwer und wird in manchen Fällen unmöglich sein. Es kommt darauf an, ob die betreffende Form durch Faktoren bedingt ist, die gerade bei dem einen Individuum wirken (Wachstumsverhältnisse usw., z. B. vorzeitiger Nahtverschluß u. a., eventuell äußere Einflüsse) oder ob die Form erblich besteht. In diesem Fall würde die betreffende sich vererbende Form zunächst bei einer in Blutsverwandtschaft lebenden Gruppe (noch nicht Rasse) gehäuft oder allgemein vorkommen können; der Art könnte eventuell das sogenannte Inkabein (s. unten) an Peruschädeln oder sonstige Varianten in einzelnen Bevölkerungsgruppen erklärt werden. Oder aber eine Form ist die herrschende bei einer größeren Gruppe, die auch durch andere Merkmale ihre Zusammengehörigkeit erweist, dann wäre auch diese Schädelbildungein „Rassenmerkmal" (s. Bd. VIII, S. 78) — all das geht ineinander über. Bezüglich solcher Rassenmerkmale ist dann vor allem zu betonen: Merkmale am Schädel rezenter Menschen, die ausschließlich einer einzigen oder einzelnen Rasse zukämen, gibt es nicht. Alle die fast zahllosen Varianten kommen überall vor, nur die Häufigkeit, eventuell der Grad der Ausbildung, wechseln. Aber dieser Wechsel ist typisch. Selbstverständlich variiert auch bei der „reinsten" Gruppe das betreffende Merkmal individuell, und da nun die Unterschiede zwischen Gruppen nur quantitative sind, werden sich fast immer die Variationsgrenzen von Gruppen überschneiden. Diese Variabilität hat man nur zu oft vergessen oder übersehen. Sie gilt auch für die Gesamtformen von Schädelkapsel, Gesicht, Nase usw. und kehrt sich nicht an unsere Kategoriengrenzen. Also eine Gruppe, die als schmalschädelige bezeichnet werden muß, bei der vielleicht 80% aller Individuen ganz schmale Schädel haben, wird doch etwa 10% solcher mit breiteren Schädeln haben; ihre breitesten

sind vielleicht breiter als die schmalsten aus einer anderen Gruppe, die an sich eben noch breitschädelig ist. Da wird man bei jenen paar breiteren nie und nimmer an Mischung denken dürfen, es sind einfach die äußersten (aber zu erwartenden und selbstverständlich notwendigen) Varianten. Daraus erhellt aber, wie vorsichtig man sein muß, wenn man auf Grund weniger, durch Zufall erhaltener Schädel Schlüsse auf Rassen ziehen will; noch hundertemal liest man über prähistorische Schädel, daß es soundso viele „schmale" und soundso viele „mittelbreite" waren und daß „also" wohl zwei Gruppen gemischt seien; das Längenbreitenverhältnis allein rechtfertigt solche Annahme nie und nimmer; man wird an solchen Einzelfunden langer und kurzer Schädel allein aus dem Index nie sagen können, ob es zwei typische Formen aus zwei wirklich verschiedenen Variationskreisen sind oder zwei nur weit auseinander stehende Individuen aus einer einzigen Variationsbreite. Daß diese Selbstverständlichkeit immer wieder vergessen wird, daß man so oft die Begriffe „Dolichocephalie" usw. als wirkliche systematische Gruppen auffaßt anstatt als bequeme kurze Ausdrücke zur Bezeichnung der Form innerhalb der gesamten menschlichen Formenskala — das rechtfertige diese lange Erörterung.

Also absolute qualitative Rassenmerkmale gibt es am Schädel nicht; wohl aber haben die einzelnen Rassen für sie tpyische Formen, Formen, die aber nicht nur im Größenverhältnis der Hauptteile, sondern auch in der Ausgestaltung aller einzelnen Teile zutage treten.

Dabei müssen wir bekennen, wir haben all diese Dinge fast nur rein deskriptiv-metrisch untersucht, von den betreffenden biologischen Gesetzen wissen wir noch fast nichts. Also wieweit die Einzelformen durch äußere Einflüsse modifizierbar sind, wie sie voneinander abhängen, welche Merkmale einander direkt oder indirekt bedingen, wie sich all dies vererbt, ob einzeln, ob zu intermediären Formen führend (was ich für ausgeschlossen halte [Verfasser]), ob alternativ, nach den Mendelschen Regeln, ob in gegenseitiger Korrelation usw. — über all das wissen wir noch beinahe nichts (vgl. Bd. VIII, S. 82 bis 84).

Im folgenden soll nun ein Hinweis gegeben werden (mehr verbietet der Raum) auf die metrisch und deskriptiv anthropologisch als wichtig erkannten Formeigentümlichkeiten. Eine eingehende und gründliche anthropologische Bearbeitung einer Schädelgruppe muß systematisch und prinzipiell alle Formbesonderheiten metrisch und deskriptiv schildern; jede solche Gruppe variiert natürlich, Zahl, Aussehen usw. der vorkommenden Einzelvarianten muß angegeben werden, ausgiebige Vergleiche mit anderen Formen müssen angestellt werden.

Eingehende Bearbeitung von Affenschädeln sind in gleicher Weise vonnöten, aber noch wenig vorhanden. Einen guten Anfang gibt Oppenheim (1911). dann sei Selenka (1898) und Schweyer (1909) genannt.

Von neuen Schädelbearbeitungen zur Frage der menschlichen Rassen seien als Beispiele (methodologisch) Wettstein (1092), Mollison (1908), v. Luschan (1907) genannt, vor allem aber die klassischen Werke von Ecker, His und Rütimeyer, Quatrefages und Hamy, Retzius, Virchow, dann zahlreiche Arbeiten von Hölder, Kollmann, Ranke, Welcker, die grundlegend waren (Archiv für Anthropologie; Beiträge zur Anthropologie und Urgeschichte Bayerns; je mehrere Bände).

3a) Form einzelner Schädelabschnitte. Die wichtigsten Unterschiede der Gesamtform, die als individuelle und bei Gruppen (einschließlich Rassen) vorkommen, sind folgende:

Den allgemeinsten Ueberblick über die Gesamtform der Gehirnkapsel gibt das Verhältnis ihrer Länge, Breite, Höhe.

Die größte Länge wird vom prominentesten Punkt der Stirne zu dem des Hinterhauptes gemessen (Tasterzirkel). Jener ist wohl stets die Glabella, dieser wechselnd, das Inion oder eine höhere Stelle. Die größte Breite mißt man (Tasterzirkel) quer und senkrecht zur Medianebene, sie liegt meistens im Bereich der Scheitelbeine, kann aber auf die Schläfenbeine rücken (doch dürfen deren „Cristae" nicht als Meßpunkte dienen; derartige Vorsprünge werden prinzipiell überall vermieden). Die Höhe des Schädels wurde sehr verschieden gemessen; die Monako-Abmachung schlägt die Strecke Basion-Bregma vor (Tasterzirkel), welche Methode auch nach Czekanowskis Untersuchungen über die 21 verschiedenen (!) vorgeschlagenen Schädelhöhen (Arch. Anthr., N. F. 1, 1904) die beste ist.

Je zwei dieser drei Hauptmaße werden nun in Beziehung gesetzt (d. h. das kürzere in Prozenten des längeren ausgedrückt) und man erhält den Längenbreitenindex, Längenhöhenindex und Breitenhöhenindex (zu berechnen nach den Formeln: $Br \times 100 : L$; dann $H \times 100 : L$, und $H \times 100 : Br$).

Der Längenbreitenindex läßt relativ schmale-lange oder „dolichocephale" (dolichos = schmal), mittlere oder „mesocephale" (mesos = mittel) und breite-kurzerunde oder „brachycephale" (brachys = breit) unterscheiden.

Man muß sich dabei bewußt bleiben, daß ein Schädel „dolichocephal" werden kann, wenn seine Länge ganz besonders

bedeutend wird bei an sich ganz stattlicher Breite, aber auch dann, wenn seine Länge gar nicht sehr groß ist, aber seine Breite ganz besonders gering. Schon daraus geht hervor, daß „Dolichocephalie" zweier Schädel oder zweier Schädelgruppen oder gar zweier Rassen etwas ganz fundamental Verschiedenes sein kann; nur relative Schmalheit zur Länge bedeutet der Name! Entsprechendes gilt natürlich für Brachycephalie.

Um jene zwei Möglichkeiten der Bildung wenigstens anzudeuten, schlägt Auerbach (Archiv für Rassen- und Gesellschafts-Biologie 9, 1912) einige neue Benennungen vor: wenn brachycephaler Index durch wirklich geringe Länge bedingt ist: Brachycephalie (s. str.) (Kurzschädel); wenn aber durch besondere Breite bei ganz respektabler Länge: Eurycephalie (Breitschädel); und entsprechend: Dolichocephalie (wirklicher Langschädel) und Leptocephalie (Schmalschädel; kann dabei sogar ziemlich kurz sein).

Aber auch die ganze übrige Schädelbildung zweier brachycephaler oder dolichocephaler Schädelgruppen (Rassen) kann fundamental verschieden sein; die eine Langschädeligkeit kann durch gleichmäßige Verlängerung der ganzen Kapsel, die andere durch starkes Auswachsen des Hinterhauptes und Vortreten der unteren Stirnpartie bedingt sein. Toldt (1910) hat z. B. auf zwei ganz typisch verschiedene Bildungen der zentraleuropäischen Brachycephalie hingewiesen und diese analysiert, eine Arbeit von prinzipieller Bedeutung, wie sie leider für die anderen europäischen Schädelformen noch größtenteils fehlen. Danach hat ein Teil brachycephaler Schädel ein ganz flaches Hinterhaupt (man kann den Schädel darauf aufstellen), Toldt nennt ihn planoccipital, während andere rund gewölbtes, prominentes Hinterhaupt haben, im ganzen der dolichocephalen Form gleichen, nur sehr breit sind, die „curvoccipitalen".

Der Index sagt also über die Details der Formen gar nichts aus; Schädel, die so fundamental voneinander abweichen können wie z. B. der eines Schweden, eines Hottentotten und eines Australiers, können genau denselben Längenbreitenindex haben. Aber andererseits kommt einer Rasse je eine gewisse Form zu, so daß die Mitte der Variationsbreite der betreffenden Rasse deutlich langschädelig oder kurzschädelig oder mittelschädelig ist; wie breit dabei die Variationsbreite ist, scheint sehr zu wechseln. So sind z. B. in Altbayern 83% der Bevölkerung wirklich kurzköpfig, in der französischen Auvergne deren 88%; Eskimos sind zu 86% dolichocephal, gewisse Melanesier zu 81% (nach Ranke). Dolichocephal sind im allgemeinen nordische Rasse, mediterrane Rasse, Neger, Australier, Hottentotten, Eskimos. Man sieht, es sind stärkst differente Gruppen.

Es sei also noch einmal betont, daß die Bezeichnungen nach Indexgruppen keinerlei systematische Bedeutung haben — und das gilt natürlich auch für Gesichtsindex, Nasenindex usw. —, sondern lediglich kurze Angaben sein sollen, um auszudrücken, wo ein Schädel oder eine Schädelgruppe innerhalb der gesamten beim Menschen möglichen Variationsbreite steht; wie sich Poniatowski ausdrückt (der den „Wert" der Indexklassifikationen untersucht (Arch. Anthr. N. F. 10, 1911), muß man die Namen gebrauchen, wie „Nord" und „Süd" oder „rechts" und „links".

So wäre es am besten gewesen, man hätte ziffernmäßige Grenzen dessen, was man noch „schmal" usw. nennt, gar nie aufgestellt; sie sind wie v. Luschan (l. c.) mehrfach stark und mit vollem Recht betont, völlig unnötig — ja, weil sie von solchen, die morphologisch eben nicht durchgebildet sind, dauernd mißbraucht werden, direkt schädlich. Lediglich, weil man zum Verständnis mancher literarischen Leistungen und Entgleisungen die einmal oft benutzten Grenzen gelegentlich wissen möchte, seien sie hier angeführt:

Längenbreitenindex:
bis 69,9 hyperdolichocephal
70,0 „ 74,9 dolichocephal
75 „ 79,9 mesocephal
80,0 „ 84,9 brachycephal
85,0 und mehr hyperbrachycephal

Längenhöhenindex:
bis 69,9 chamäcephal (chamai niedrig)
70,0 „ 74,9 orthocephal (orthos recht, mittel)
75,0 und mehr hypsicephal (hypsi hoch)

Gesichtsindex (s. unten).
bis 74,9 chamäprosop (prosope Gesicht)
75,0 „ 89,9 mesoprosop
90,0 und mehr leptoprosop (leptos schmal)

Nasenindex (s. unten).
bis 46,9 leptorhin (rhin Nase)
47,0 „ 50,9 mesorhin
51,0 und mehr platyrhin (platys breit)

Orbitalindex (s. unten).
bis 79,9 chamäkonch (konchae Augenhöhle)
80,0 „ 84,9 mesokonch
85,0 und mehr hypsikonch.

Gaumenindex (s. unten).
bis 79,9 leptostaphylin (staphylae Gaumen)
80,0 „ 84,9 mesostaphylin
85,0 und mehr brachystaphylin u. a. m.

Daß wegen der vielen Mißbräuche bei der Benutzung der „Kategorien" von einzelnen dann die ganze Indexbenutzung verworfen wurde, ist sicher unrecht; ja wenn v. Török (Arch. Anthr. 1906) an ihre Stelle die Benutzung von absoluten Werten setzt, diese aber dann auch wieder in Kategorien teilt, in absolut kurze, lange, breite usw. so ist das noch viel schlimmer und unbrauchbarer.

Neben der Längenbreitenuntersuchung (Längenbreitenindex) spielte die von Länge und Höhe sowie Breite und Höhe eine viel geringere Rolle. Daß aber auf die Höhe außerordentlich viel ankommt, zeigen die Formen der Neandertalgruppe mit ihrer

auffallend geringen Höhenentwickelung (s. den Artikel „Fossile Hominiden", Bd. IV S. 344). Aber außer diesen Hauptdimensionen lassen sich noch eine ganze Reihe anderer Formeigentümlichkeiten leicht metrisch festlegen; so die kleinste Stirnbreite, am vordersten, medialsten Punkt der Schläfenlinien zu nehmen (Gleitzirkel), die größte Stirnbreite, zwischen den am weitesten lateralwärts ausgeladenen Punkten der Coronalnaht (Taster- oder Gleitzirkel), und viele andere, bezüglich derer auf die Technik und auf die Lehrbücher verwiesen werden muß (s. Fig. 3). — Auch auf all die Maße, die für Einzelzwecke gewonnen werden und die zum Teil auch prinzipiell und allgemein von allergrößter Bedeutung sind, kann nicht eingegangen werden.

Der Inhalt des menschlichen Schädels beträgt zwischen rund 1000 und 2000 ccm. Gegen beide Enden dieser Reihen handelt es sich um pathologische Formen. Das Mittel für die zentraleuropäische Bevölkerung ist 1450 bis 1500 ccm für männliche, 1300 bis 1340 ccm für weibliche Schädel. Neger haben um etwa 150 ccm kleinere Schädel (1300 bis 1350 ccm), Buschmänner noch kleinere (1250 bis 1300 ccm). Die Größe hängt, von Rasse und Geschlecht abgesehen, von der Körpergröße ab (man hat auch bezüglich der Größe Einteilungen vorgenommen). Welcker u. A. haben Methoden angegeben, aus Umfangsmessungen den Inhalt zu berechnen; die Methoden der Messung der Umfänge und einzelner Bogenabschnitte können hiermit nur kurz genannt werden. Die pathologischen Größen endlich beruhen einerseits auf Mißbildung des Gehirnes (Mikrocephalie), was dann eine Verkleinerung des Schädels auf 400 ccm und darunter bedingt — es handelt sich um krankhafte Bildungen, die für den Anthropologen ohne Interesse sind. Dasselbe gilt von den entgegengesetzten Bildungen, den Cephalonen, Wasserköpfen (Hydrocephalus).

Auch das Gewicht des menschlichen Schädels wird anthropologisch berücksichtigt; man wägt meist ohne Unterkiefer; Alter und individuelle Einflüsse sind von gewaltiger Bedeutung; ausgegrabene Schädel sind dabei unverwendbar.

Am Gesicht mißt man als Höhe, die Entfernung vom Nasion zur Unterseite des Kieferrandes (Fig. 1 und 3), als Breite die stärkste Ausladung der Jochbögen. Diese in jener prozentual ausgedrückt ergibt den „Gesichtsindex" (Gruppen desselben s. oben) wie er von Kollmann (1881) bearbeitet wurde (die Virchowschen Gesichtsmaße mit anderen Meßpunkten sind natürlich mit diesen nicht direkt vergleichbar, sie werden wenig mehr benutzt).

Besonders zahlreiche Bearbeitung erfuhr die sogenannte Prognathie. Die Profillinie des Gesichtes kann entweder ziemlich senkrecht verlaufen bei Horizontalhaltung des Schädels

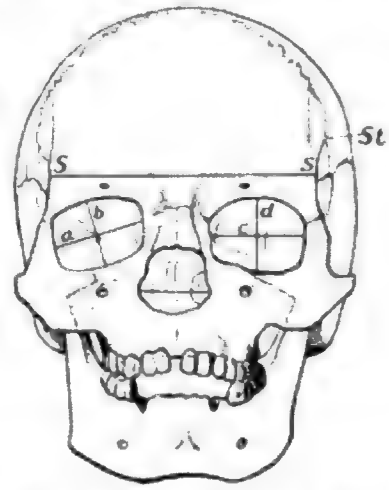


Fig. 3. Schädel in der Norma frontalis. SS kleinste Stirnbreite, a größte Orbitabreite, b senkrechte Höhe dazu, c „horizontale" Orbitabreite mit d, senkrechter Höhe dazu. — Aus Schmidt (1888).

oder aber von der Stirn bis zur Zahnschneide stark nach vorn biegen, so daß der Kieferapparat schnauzenartig nach vorn tritt; dies Verhalten nennt man Prognathie, das erstere Orthognathie. Die Prognathie (gnathos Kiefer) kann das ganze Gesicht betreffen (Gesichtsprognathie) oder aber der obere Teil des Gesichtes ist steil aufgebaut wie bei orthognather Bildung und nur der die Zähne tragende Teil des Kiefers biegt plötzlich nach vorn und außen und springt für sich allein schnauzenartig vor (alveoläre Prognathie). Man kann den Grad dieser Bildung durch Berechnung aus im Schädel konstruierten Dreiecken messen (z. B. Klaatsch [l. c.] u. a.) oder mit Winkeln, Profilwinkel, wobei natürlich eine Horizontalebene angenommen werden muß (s. Fig. 1). Man nennt Profilwinkel von 83 bis 90° orthognath, bis 82° prognath. Kinder sind stärker orthognath als Erwachsene. Prognath sind rassenmäßig Neger, viele Malayen, Australier u. a.

Von den einzelnen Teilen des Gesichtes (Fig. 3) sind Augen- und Nasenhöhle und Gaumen genauer bearbeitet. Der Augenhöhleneingang ist bald hoch „aufgerissen" (wie es typisch für Affen ist), bald niedrig und breit; man mißt diese Unterschiede und berechnet einen Index (s. oben). Die queren Achsen stehen bald annähernd querhorizontal, bald sind sie nach außen stark gesenkt (s. Adachi [1904], Kalkhof [1911], Wolf [1906]). Der Nasenhöhleneingang ist ebenso stark in der Form wechselnd („Index" s. oben), bald gleicht er einem um-

gekehrten schmalen Kartenherz, bald ist er fast rund. Reche (1907) zeigt, daß der gewöhnlich genommene Nasenindex (s. oben) zur Charakterisierung der menschlichen Nase gegen die tierische ganz unbrauchbar ist und gibt einen anderen an, der die Breite und Lage der Nasenbeine mit berücksichtigt (s. Reche). Die Nasenbeine legen sich bald dachfirstartig aneinander an, dabei scharf und eventuell geschwungen aus dem Gesicht vorstehend (gerade Nasen, Adlernasen usw.), bald liegen sie beide fast in einer Ebene, der Gesichtsfläche, sind breit und kurz, eine völlig flache Nasenwurzel bedingend.

Die Gaumenbreite (die Entfernung der Alveolarränder der 2. Molaren) und Gaumenlänge (von der Basis der Spina bis zum Alveolarrand eines mittleren Schneidezahnes) geben den Gaumenindex (s. oben), aber praktisch wichtiger ist die Gaumenhöhe und ob seine Wölbung oben eng oder breit und flach ist (hier findet man außerordentlich häufig gegen das Pathologische liegende Formen). Und theoretisch (Phylogenese) wichtig ist die Form des Alveolarbogens, ob U-förmig oder halbkreisförmig.

Auf die Untersuchung der Form des Foramen magnum, wo man Länge und Breite mißt, des Sattelwinkels, der die Abknickung der Schädellängsachse angibt, der vergleichend so wichtigen Interorbitalbreite, auf die umfangreiche Untersuchung des Unterkiefers ist es leider unmöglich hier einzugehen; an letzterem hat man die Condylenbreite, Astwinkel, Breite und Dicke vor allem der Symphyse gemessen, dann ist das Kinn ein anthropologisch äußerst interessantes Problem (s. v. Török [l. c.], vor allem Klaatsch [l. c.]; vgl. den Artikel „Fossile Hominiden", Bd. IV S. 359 und Literatur; Walkhoff [1911]).

Endlich muß auf eine große Anzahl Formen hingewiesen werden, die als nicht normale zu bezeichnen sind. Wenn Nähte abnorm früh, d. h. schon während der Wachstumsperiode verschmelzen, so hört an der Stelle das Wachstum auf, es wächst der Schädel also nicht mehr in der Richtung senkrecht auf den Verlauf der betreffenden Naht. In den anderen Richtungen findet dann meist vermehrtes Wachstum statt und führt zu höchst sonderbaren Schädelformen. So entstehen Turmschädel (Acrocephalie) mit ganz flachem steil aufsteigendem Hinterhaupt und hoher flacher Stirn, dann Kahnschädel (Scaphocephalus), die von oben her gesehen einem umgestülpten Kahn mit längsverlaufendem Kiel gleichen; starke Asymmetrien kommen vor, durch einseitige Nahtverknöcherungen (Plagiocephalie) u. a. m. Abnorme Plastizität des Schädels kann zu einer Einwölbung der Schädelbasis führen (Platybasie) und anderen Mißformen (Welcker, Virchow, Topinards Lehrbuch usw.). Bei ausgegrabenen Schädeln hat der Anthropologe an „posthume Deformation" zu denken; unter gewissen Umständen kann der Schädel im Boden etwas plastisch werden, seine Form ändern, ohne daß die Knochen brechen, so daß seitliche Abflachung, Asymmetrie usw. entstehen können.

Endlich ist auf die absichtliche künstliche Deformierung hinzuweisen, die sich der Schädel sehr oft und sehr intensiv gefallen lassen mußte. Man kennt zahlreiche solche Formen aus dem prä- und frühhistorischen Europa (Schliz 1905), aus Indien, Melanesien usw., aber das eigentliche Land der künstlichen Schädelformen war das alte Peru, dann Mexiko, Florida und andere Bezirke in Mittel- und Südamerika. Der Kopf der Kinder wurde mit Binden oder durch Aufbinden von Brettchen usw. von vorn her komprimiert und wuchs nun zu bizarren Formen; hohe Turmformen, breite flache steil aufragende Scheitel usw. waren das Resultat. Irgend etwas von der eigentlichen ursprünglichen Form ist nicht mehr zu sehen. Das Gehirn paßte sich der Form an; immerhin scheint die Kindersterblichkeit groß gewesen zu sein. — Vgl. Lenhossek (1881), Ranke (1909), Virchow (1892) und die Lehrbücher.

Gelegentlich haben auch europäische Trachten leichte Grade von Deformierung, quere seichte Rinnen gemacht, nämlich festgebundene Haubenbänder (sogenannte Helgoländerhaube; Toulouse, Bretagne u. a.) (s. Topinard). — Die ethnische „Trepanation" am lebenden Schädel geht nur den Ethnologen an, nicht den Anthropologen.

3b) Varianten an Einzelknochen. Neben all diesen die Form ganzer Schädelabschnitte behandelnden Untersuchungen treten dann in Unzahl solche, die sich mit Einzelheiten an einzelnen Knochen beschäftigen. Le Double (1904) gibt eine umfängliche Zusammenstellung (2 Bde.). Bartels (1904) zeigt, wie nötig hier ein systematisches Arbeiten wäre. Da sind zunächst die Knochennähte zu untersuchen. Ihre Zahl schwankt stark, indem gar nicht selten sogenannte überzählige Nähte auftreten; es können Nähte, die in jugendlichen (oder embryonalen) Stadien da sind und dann verwachsen sollen, offen bleiben oder aber es treten neue auf, an Stellen, wo normal gar keine sind. Aus ersterer Gruppe kann z. B. die Stirnnaht offen bleiben, und das geschieht bei Europäern in etwa 12 bis 26%, bei Mongolen nur in 3% und bei Negern, Melanesiern, Australiern je in 2 oder 1% (eine phylogenetische Erklärung — Gehirnwachstum — ist nicht eindeutig). Ebenso kann eine embryonale Naht (bezw. Verschmelzungslinie) im Bereich

des Hinterhauptes persistiert bleiben und dadurch definitiv eine Naht durch das Hinterhauptsbein gehen, so daß dessen obere Ecke abgespaltet ist; das fand man an 0,5 bis1 % Schädeln bei uns, an 5 bis 6% Peruanerschädeln, weshalb die Bildung als Inkabein bezeichnet wurde. — Auch die Sutura incisiva sei genannt, die den alten Zwischenkiefer persistiert anzeigen kann. — Die andere Gruppe, neu auftretende Nähte, sei hier mit dem Beispiel einer Naht durchs Scheitelbein hindurch belegt, oder als ganz seltene Varietät eine Naht durchs Jochbein, die bei Japanern etwas häufiger vorkommt und Sutura japonica genannt wurde. Hierher gehören die Erscheinungen vieler überzähliger Knochenstücke, bedingt durch abnorme Nähte, die Knochenecken oder rundliche kleine Knochenstücke im Bereich von Nähten umfassen; sie werden als Schaltknochen, Nahtknochen, Zwickelbeine, Ossa Wormiana usw. bezeichnet (es muß auf die Lehrbücher, auch die anatomischen verwiesen werden). Einzelne besonders häufige haben besondere Namen, Os praeinterparietale, epipterium usw. — Auch überzählige Fontanellen und Residuen von solchen gibt es eine ganze Anzahl. Die Literatur über all das ist schier unübersehbar so daß auf Zitate im allgemeinen verzichtet werden muß, es sei nur auf Le Double (1904), Frassetto (1901), Hrdlicka (1903), Maggi (1898), Ranke (1899, 1902), Schwalbe (1903) hingewiesen.

Für die Form der Nähte, die Kompliziertheit der Zacken hat Broca ein Schema aufgestellt, das dann von Oppenheim (1907) wesentlich verbessert wurde.

Sehr interessant ist dann die Reihenfolge der Nahtobliteration, die nach Individuen und Rassen variiert, aber gerade über den letzteren Punkt wissen wir wenig wirklich Exaktes (s. Frédéric 1906). An Affen untersuchte Bolk dasselbe (Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie 1912).

Abgesehen von Nähten sind eine Menge Fortsätze, Gräten, Löcher an allen einzelnen Knochen beschrieben worden; der Knochen zeigt sich eben beeinflußbar durch seine Nachbarschaft; Muskelursprünge können Leisten usw bedingen (starke Temporalmuskeln z. B. bedingen sehr starke Lineae temporales, die zugleich weit nach aufwärts wandern, so daß die davon freie Scheitelpartie schmal wird; man vgl. die entsprechenden Leisten beim Orang (Selenka); s. oben S. 842. Auch das Gehirn prägt dem Schädel seine Form mancherorts auf, so daß ein Schädelausguß viele Windungen (und Arterien) erkennen läßt, ja auch die Schädelaußenseite zeigt gewisse Erhabenheiten, die denen des Gehirnes entsprechen. Darauf beruhte der Versuch Galls, am lebenden Schädel geringere oder stärkere Ausbildung mancher Gehirnteile abzutasten und daraus auf die Stärke gewisser psychischer Eigenschaften („Sinne") zu schließen.

Die meisten jener Lokalisationen sind falsch; keine rassenmäßigen und individuellen psychischen Unterschiede können ihre Lokalisationsstelle in der Hirnrinde derart vergrößern oder verkleinern, daß sich das am Schädel abprägt, so ist die Gallsche Lehre völlig verlassen (s. Möbius 1905). Aber gewisse Erhabenheiten auf dem Schläfenteil des Schädels hängen doch von der Form des Hirnes ab (s. Schwalbe 1902 und Fr. Müller 1908).

Bezüglich der Hunderte von Einzelheiten usw. sei auf Le Double (1904) und dessen Literaturangaben verwiesen.

III. Anhang (Zähne).

Die Zähne (die trotz ihrer anatomischen Zugehörigkeit zum Verdauungsapparat anthropologisch meist mit den übrigen Hartgebilden besprochen werden), sind anthropologisch vor allem wichtig wegen ihrer außerordentlich guten Erhaltung als Fossilien. So fanden natürlich die Zähne der fossilen Hominiden (s. d. Bd. IV, S. 350) gebührende Beachtung, aber auch die etwas weiter abstehenden Anthropomorphenzähne interessieren besonders stark (s. Adloff [1908], Branco [1898]). An den heutigen Menschenzähnen bearbeitete man einmal die Erscheinungen des Rudimentärwerdens gewisser Zähne und des Wiederauftretens verlorener; zu ersteren gehören der Weisheitszahn, der alle Formen vom vielhöckerigen typischen Backzahn bis zum kleinen Stiftzähnchen aufweisen oder ganz fehlen kann, dann der äußere obere Schneidezahn; abnorm erscheinen kann vor allem ein 4. Molarzahn (auch andere), vgl. Wiedersheim (1902). Mehrfache Hypothesen suchen diese Erscheinungen zu erklären Bolk [1910] gegen Adloff [1911, 1913]).

Weiter untersucht man die wechselnde Größe der einzelnen Zähne — viele sogenannte primitive menschliche Gruppen scheinen etwas größere Zähne zu haben, die Primigeniusform hatte sicher größere (breitere usw.) — dann die Oberflächenformen: da werden die Höckerzahlen, das Vorkommen von Nebenhöckern, das Auftreten von Schmelzrunzeln usw. untersucht, ebenso das Verhalten und die Zahl der Wurzeln. De Terra (1905) gibt eine gute Zusammenstellung auf Grund eigener Untersuchung.

Endlich hat Welcker die Bißformen systematisch zusammengestellt. Er unterscheidet Aufbiß (Labidodontie, labis = Zange), den Ueberbiß (Psalidodontie, psalis = Schere), die Dachform (Tegodontie), bei der die Unterzähne von den schräg nach außen

stehenden Oberzähnen gedeckt werden und die Hiatodontie, das Klaffen der Schneiden der Vorderzähne bei sich berührenden Backzähnen (pathologisch). Ueberbiß ist das Normale (ca. 80%) bei uns; Aufbiß („Hundebiß", „Kopfstellung") das Normale bei Australiern (100%) und Negern (53%) u. a., während nur 17% Aufbiß bei uns vorkommen.

B. Skelettlehre.

I. Technik.

Neben Messungen, die genau wie in der Kraniologie ausgeführt werden (Bandmaß, Taster- und Gleitzirkel, zum Teil in größeren Exemplaren), bedingen gewisse Formen der Extremitätenknochen noch besondere Instrumente. Broca hat ein „Meßbrett" eingeführt (s. Techniken und Lehrbücher), ein Brett mit je einem handhohen Längs- und Querseitenrand; Oberfläche des Brettes und Innenseite des Randes sind in Millimeter geteilt; man mißt darauf die Länge des Knochens und die Breite der Gelenkenden. Zur Messung von Biegungen und Drehungen (Torsion) um die Längsachse werden meist Nadeln auf die Knochen in der Richtung der interessierenden Achsen festgeklebt und dann deren gegenseitige Winkel gemessen, meist in der Projektion. Dazu wird der Knochen im „Osteophor" aufgestellt; dieser hat die Form der Gestelle, die Chemiker zum Halten von Kochflaschen usw. benutzen, oder ist besonders konstruiert, meist als austauschbares Ansatzstück an Kraniophore (s. oben Wetzel und Stolyhwo). — Mit besonderen Zeigerinstrumenten kann man die Lage der Nadeln aufnehmen (s. oben Martin, l. c.). — Die Querschnittform wird mit besonderem Apparat aufgezeichnet (Michel, Arch. Anthr. N. F. I, 1904) oder man stellt Abgüsse davon her, indem man Wachsbänder um die betreffende Stelle legt und diese unter Wahrung der Form abnimmt und mit Gips ausfüllt (Fischer 1906). Der Kubikinhalt von Knochen wird nach dessen Wasserverdrängung gemessen (Wetzel 1910).

Endlich sei auf die einzig richtige Methode der Skelettzusammensetzung hingewiesen, die H. Virchow (1892) angibt, die „nach Form", d. h. nachdem man von den unverletzten Weichteilen und im Laufe der Präparation Gipsabgüsse gemacht hat, die einen wirklich naturgemäßen Wiederaufbau garantieren.

Auch auf die Untersuchung mit Röntgenstrahlen ist hinzuweisen (z. B. Walkhoff 1904).

II. Ergebnisse.

Kein einziger Knochen ist auch nur annähernd so durchgearbeitet wie der Schädel, ja die meisten sind sozusagen überhaupt noch nicht systematisch und prinzipiell durchgearbeitet.

Die Wirbel wurden zunächst vergleichend-anatomisch behandelt, wobei sich zeigte, wie die zahlreichen Variationen der Zahl der einzelregionalen Wirbel (Hals-, Brust-, Lenden- usw.) in Entwickelungsreihen gehören.

So finden also sogenannte „überzählige" oder „mangelnde" Wirbel ihre Erklärung (Rosenberg 1912). — Für den Atlas konnte man dann aus der Entwickelungsgeschichte (phylo- und ontogenetisch) Fälle seiner Verschmelzung — ganz oder partiell — mit dem Hinterhaupt erklären (Kollmann 1905, Bolk 1906). — Viel mehr Beachtung hat das andere Ende der Wirbelsäule gefunden, der menschliche Schwanz. Daß es geschwänzte Menschenrassen nicht gibt, ist erst heutzutage selbstverständlich geworden. Aber daß der Mensch ebenso selbstverständlich von geschwänzten Vorfahren abstammt, daß seine Ontogenese noch dafür die Beweise zeigt, ist ebenfalls erst kurz anerkannt. So erklären sich die auf Hemmungsmißbildungen beruhenden Fälle von „Schwanzbildung", ferner gehört hierher Foveola coccygea und Vertex coccygeus, Steißgrübchen und -haarwirbel. — Man vgl. Anatomische Lehrbücher, ferner insbesondere Wiedersheim, Bau des Menschen, Tübingen 1908. — Differenzen der Größe der einzelnen Wirbel hat Klaatsch (1902) dargetan, dann Wetzel (1909, 1910) etwas eingehender untersucht, so ist z. B. die Halswirbelsäule bei Negern am stärksten entwickelt, dann kommen Australier, dann Europäer; das Sacrum ist umgekehrt bei Europäern am stärksten, bei Australiern am schwächsten. Viel Beachtung fand der verschiedene Grad der Lendenlordose, die bekanntlich durch die Keilform der Lendenwirbelkörper bedingt ist (vgl. Cunningham [1886]). Man mißt die vordere und hintere Höhe eines Lendenwirbels und drückt diese in Prozenten jener aus, um den Lendenwirbelindex zu erhalten. Die Summe je der betreffenden fünf Maße läßt den Lendenindex berechnen. Bei fehlender Kreuzbiegung ist der Index 100; bei Europäern soll er etwa 94 sein, bei Negern, Australiern 105 bis 110; bei Affen ist er über 110. — An Rippen und Brustbein ist anthropologisch wenig gearbeitet (bezüglich überzähliger Rippen, Rippenverlust, Thoraxform usw. vgl. Wiedersheim, l. c.)

An den „Langen Knochen" mißt man Länge, Umfang des Schaftes, Dicke der Gelenkenden, etwaige Winkel zwischen Endteilen und Schaft, einzelne Durchmesser usw. Die Längenmessung hat eine gewisse Schwierigkeit, weil die Enden fast überall durch Gelenkrelief oder Vorsprünge kompliziert sind. Es ist jedesmal genau zu präzisieren, wo man die Länge mißt, da mehrere Methoden

im Brauch sind. — Aus der Länge der einzelnen Arm- und Beinknochen kann man mit Rechnung (die empirisch gefunden wurde) die Körperlänge bestimmen, Manouvrier (1892) hat die Methoden angegeben, die natürlich nur approximativ sind und für Formen gelten, deren Proportionen denen der heutigen Europäer etwa entsprechen. — Die Dickenmessung ist erschwert, weil es nicht für alle Primaten je entsprechend liegende dickste Schaftstellen gibt; meist bestimmt man Umfang und einige Durchmesser an verschiedenen Stellen.

An der Dicke der Gelenkenden hat man ein gutes Hilfsmittel zur Bestimmung des Geschlechtes des betreffenden Skelettes (Dwight, Amer. Journ. Anat. 4, 1904). Daneben gibt es natürlich eine Menge deskriptive Merkmale, so z. B. am Humerus die Durchbohrung der Fossa olecrani, die an Wedda-, Neger-, neolithischen Humeri in 30 bis 50 % vorkommt, bei uns in ca. 2 %. Der Drehungswinkel des Armes, d. h. der Winkel, den die untere Querachse und die obere Symmetrieachse der Gelenkenden in Projektion miteinander bilden, beträgt beim Europäer ca. 168°, beim Neger 154°, bei Affen 90 bis 150° (Topinard; Lambert, Diss. Zürich 1904). An Radius und Ulna kommt es auf die Biegung (Spatium interosseum) auf die Erhebung der Olecranonkuppe u. a. an, wie Fischer (1906) zeigte. — Die Varietäten in Zahl und Auftreten von Carpal- und Tarsalelementen hat Pfitzner (1896, 1900) studiert (s. Wiedersheim), Thilenius ihre Entwickelung (Morphologische Arbeiten, 1895).

Sehr eingehend wurde das Becken untersucht, da es auch den Praktiker interessierte (vgl. Lehrbücher der Geburtshilfe, vor allem ältere). Es gibt — wie überall — auch hier keine durchgreifenden Rassenformen, wohl aber sind einzelne Formen für die und jene Rasse typisch, der Europäer hat ein querovales, der Neger ein keilförmiges Becken, das enger ist als jenes (Verneau 1875). — Am Femur kommt es auf Biegung, Form des unteren Gelenkendes an, wie Klaatsch (1901) (mit Literaturverzeichnis!) dartut. Die Linea aspera ist gelegentlich als hohe Leiste entwickelt, sogenannte „Pilasterbildung" (Manouvrier), die ebenso wie die Platymerie des Schaftes und die Platyknemie des Schienbeines, d. h. Abflachung der betreffenden Knochen von rechts nach links und starke Entwickelung des antero-posterioren Durchmessers von der sagittalen Beanspruchung beim „Hocken" vieler Stämme abhängt. Dieselbe Benutzung der Knochen bedingt eine kleine besondere Gelenkfacette vorn am unteren Ende der Tibia, eventuell am Talus, bedingt eine Zurückbiegung des oberen Endes der Tibia, sogenannte Retroversion, die an fetale Verhältnisse (Retzius) anknüpft. All diese Dinge kommen bei menschlichen Gruppen (heute und prähistorisch) vor, die viel „hocken". Am Fußskelett kommt es auf das Größenverhältnis von Fußwurzel und übrigem Fuß an, das z. B. Sarasin (1892) beim Wedda ziemlich primitiv, nämlich mit relativ kurzem Fußwurzelabschnitt fand; dann ist gelegentlich die Abspreizung der ersten Zehe noch an pithecoide Verhältnisse erinnernd. Manche Rassen scheinen breiteren Fuß zu haben (Malaien, Melanesier) als andere.

Auf die künstliche Deformierung des Fußes der vornehmen Chinesinnen sei kurz hingewiesen; der Fuß wird durch Umschnürung während des Wachstums und später klumpfußartig verkrüppelt, die Einzelknochen werden außerordentlich deformiert (s. Haberer 1902 und vor allem Virchow 1905).

All diese Dinge konnten hier nur flüchtig angedeutet werden, um zu zeigen, in welcher Richtung überhaupt gearbeitet wird. Es gibt eine ganze Reihe Werke, die monographisch die Einzelknochen oder die sämtlichen Extremitätenknochen einzelner menschlichen Gruppen bearbeiten. Auf diese muß verwiesen werden, z. B. Bumüller (1900), Fischer (1906), Klaatsch (1900, 1902), Lehman-Nitsche (1895), Sarasin (1892), Schmidt „Methoden" (l. c.). Eine „Abmachung" über Technik existiert nicht; das in den Sammlungen vorhandene Material ist außerordentlich viel geringer, als das an Schädeln, doch haben die großen Sammlungen immerhin reiche Schätze.

Als Anhang zur Anthropologie des gesamten Skelettes sei noch auf die Methoden der Materialbeschaffung hingewiesen. Anthropologischer Bearbeitung zugänglich sind bei uns die Skelettreste in Ossuarien oder Beinhäusern, kapellenartigen Räumen oder Kapellen (Bayern, Tirol, Schweiz, Elsaß), wo exhumierte Schädel aufgestapelt liegen. — Ausgrabungen haben sehr oft mit der außerordentlichen Brüchigkeit des Materials zu kämpfen. Wie rasch Knochen zerfallen, hängt nur von den Bodenverhältnissen ab, nach wenigen Jahren (Tropenhumus) oder Jahrtausenden —, am Knochen selbst ist das Alter nie zu entscheiden. Man wendet besondere Methoden der Leim- oder Paraffindurchtränkung an, wie sie die Paläontologen üben, um brüchiges Material zu retten. Bezüglich Fundjournalführung und aller Einzelheiten muß auf die Techniken (l. c.) verwiesen werden. Im überseeischen Ausland ist Skelettmaterial außer durch Ausgrabungen oft aus besonderen Schädelaufbewahrungsstätten zu erhalten (Trophäen, Bestattungen, Heiligtümer usw.), dann aus Krankenhäusern usw. (man vgl. für letztere Quelle die anatomischen Techniken der

Konservierung und Skelettierung). Die Andeutungen müssen hier genügen.

Literatur. Zu A. I. (Technik). Davenport, Statistical Methods. New York 1904. — Falkenburger, Diagraphische Untersuchungen etc. Arch. Anthr. 12, 1913. — Frassetto, Lezioni di Antropologia, 2. Bologna 1911. — Frortep, Bestimmung der Schädelkapazität usw. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 13, 1910. — Fürst, Index-Tabellen. Jena 1902. — Derselbe, Einiges über anthropologische Winkelmessungen usw. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 9, 1906. — Klaatsch, Über die Variationen am Skelette der jetzigen Menschheit usw. Anthr. Korrespbl., 33, 1902. — Derselbe, Kraniomorphologie u. Kraniotrigonometrie. Arch. f. Anthr., 8, 1909. — v. Luschan, Anthropologie usw. in: Anleitung zu wissenschaftlichen Beobachtungen auf Reisen, herausg. v. Neumayer. Hannover 1905. — Derselbe, Die Konferenz von Monaco. Anthr. Korrespbl., 37, 1906. — Martin, Anthropometrisches Instrumentarium. Anthr. Korrespbl., 30, 1899 und Neuere Instrumente usw. Ebenda 1903. — Derselbe (ein umfängliches Lehrbuch). Jena 1913 (1914?). — Mollison, Neue Instrumente zur Messung von Winkeln und Krümmungen. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 10, 1907. — Ranke, Der Mensch. Leipzig 1894 (diese II. Aufl. hat diesbezüglich mehr als die III. 1912). — Schlaginhaufen, Zur Diagraphentechnik usw. Zeitschr. f. Ethnol. 1907 u. „Ergänzungen" dgl. 1912. — E. Schmidt, Anthropologische Methoden. Leipzig 1888. — Stolyhwo, Der Osteophor-Projektiometer. Anthr. Korrespbl. 1910 u. L'Anthropologie 1911. — Topinard, Éléments d'anthropologie générale. Paris 1885. — v. Török, Grundzüge einer systematischen Kraniometrie. Stuttgart 1890. — Wetzel, Apparate und Erläuterungen zur perigraphischen Technik. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 13, 1911.

Zu A. II. (Kraniologie). Oben zitierte Lehrbücher von Frassetto, Martin, Ranke, Topinard. Dann: Adachi, Orbita . . . der Japaner . . . Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 7, 1904. — Bannwarth und Studer, Crania helvetica antiqua. Leipzig 1894 — Bartels, Geschlechtsunterschiede am Schädel. Diss. Berlin 1897. — Derselbe, Rassenunterschiede am Schädel. Intern. Monatsschr. f. Anat. u. Phys. 1904. — Bauer, Anthropologie . . . des harten Gaumens. Arch. f. Anthr. 1904. — Davis, Sur les deformations plastiques. Mém. Soc. d'Anthr. 1860. — Davis und Thurnam, Crania britannica. London 1865. — Le Double, Variation de l'os du crâne Paris 1904 . . . des os de la face . . . Paris 1906. — Ecker, Crania Germaniae. Freiburg 1865. — Engel, Knochengerüste des menschlichen Antlitzes. Wien 1850. — Frassetto (Suture . . . Fontanelle . . . etc.). Anat. Anz., 19, 1901. — Derselbe, Scafocefalia, Atti Soc. Rom. antr. 1905. — Derselbe, Oxicefalia . . . Atti Congr. Nat. Milano 1907. — Frédéric, Die normale Obliteration der Schädelnähte. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 9, 1906, 12, 1909. — His und Rütimeyer, Crania helvetica. Basel 1864. — Hrdlicka, Division of parietal . . . Bull. Amer. Mus., 19, 1903. — Kalkhof, Anthropologie der Orbita. Diss. Freiburg 1911. — Klaatsch, zitiertes Handbuch, Bd. 4, S. 359. — Kollmann, Beiträge zur Kraniologie der europäischen Völker. Arch. f. Anthr., 13, 14, 1881 bis 1882. — Langer, Gesichtsbildung. Mitt. Wiener anthr. Ges. 1870. — v. Lenhossek, Künstliche Schädelverbildungen. Wien 1881. — v. Luschan, Sammlung Baessler, Schädel von polynesischen Inseln. Berlin 1907. — Maggi, Sur des os crâniens . . . sur des fontanelles . . . . Arch. ital. Biol., 30, 1898. — Möbius, Gall. Leipzig 1905. — Mollison, Kraniologie und Osteologie der Maori. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 11, 1908. — Müller, Craniocerebrale Topographie. Ergebn. d. Anat. u. Entwickl., 18, 1908. — Oppenheim, Die Suturen des menschlichen Schädels. Anthr. Korrespbl. 1907. — Dieselbe, Typologie des Primatencraniums. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 14, 1911. — Quatrefages et Hamy, Les crânes des races humaines. Paris 1882. — Ranke, Die überzähligen Hautknochen des menschlichen Schädeldaches Abh. Bay. Akad. (math. Kl.), 20, 1899. — Derselbe, Zwischenkiefer. Ebenda, 31, 1902. — Derselbe, Altperuanische Schädel. Ebenda 1909. — Reche, Nasenindex. Anthr. Korrespbl. 1907. — A. Retzius, Ethnologische Schriften (Neudruck). Stockholm 1864. — G. Retzius, Crania suecica. Stockholm 1900. — Schlitz, Künstliche deformierte Schädel in germanischen Reihengräbern. Arch. f. Anthr., N. F., 3, 1905. — Selenka, Menschenaffen. Wiesbaden 1898—1900. — Sergi, Variationen des menschlichen Schädels. Arch. f. Anthr., N. F., 3, 1905 (Literatur!). — Schwalbe, Geteilte Scheitelbeine — Stirnnaht —. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 6, 1903, 7, 1904. — Derselbe, Innenform und Außenform des Schädels. Arch. f. klin. Med. 1902. — Schweyer, Schädel des Inuus spec. Diss. München 1909. — Stratz, Naturgeschichte des Menschen. Stuttgart 1904. — Toldt, Brachycephalie der alpenländischen Bevölkerung. Mitt. anthr. Ges. Wien 1910. — R. Virchow, Crania ethnica americana. Berlin 1892. — Walkhoff, Neuere Untersuchungen über Kinnbildung. Leipzig 1911 (H. 22 d. deutsch. Zahnheilk. v. Witzel). — Welcker, Wachstum und Bau des menschlichen Schädels. Leipzig 1862. — Wettstein, Anthropologie . . . Dissentis. Zürich 1902. — Wolff, Anthropologie der Orbita. Diss. Zürich 1906.

Zu A. III (Zähne). Adloff, Gebiß des Menschen usw. Berlin 1908 (gegen Bolk: Zeitschr. für Morph. und Anthr. 1911, 1912. Arch. mikr. Anat. 1913. — Bolk, Phylogenese des Primatengebisses usw. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 13, 1910, 14, 1911.*) — Branco, Die menschenähnlichen Zähne aus dem Bohnerz usw. Jahrh. Ver. vaterl. Naturkunde. Stuttgart 1898. — de Terra, Odontographie der Menschenrassen. Berlin 1905. — Welcker, (betr. Bißformen), Arch. f. Anthr. 27, 1902. — Wiedersheim, Bau des Menschen. Tübingen 1902.

Zu B. (Skelettlehre). Bolk, Assimilation des Atlas usw. Anat. Anz. 1906. — Bumüller, Das menschliche Femur usw. Diss. München 1900. — Cunningham, Lumbar curve in Man and Apes. R. Irish Acad. 1886. — Fischer, Radius und Ulna. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr., 9, 1906. — Haberer, Schädel- und Skeletteile aus Peking. Jena 1902. — Klaatsch, Variationen am Skelett der unteren freien

*) Anmerk. b. d. Korr.: Soeben auch ausführlich. Jena 1913.

Extremität. Ergebn. d. Anat. u. Entwickl., **10**, *1900.* — **Derselbe,** *Variationen am Skelette usw. Anthr. Korrespbl. 1902.* — **Kollmann,** *Varianten am Os occipit. Verhandl. Anat. Ges. 1905.* — **Lehmann-Nitsche,** *. . . die langen Knochen der südbayerischen Reihengräberbevölkerung. Beitr. z. Anthr. u. Urgesch. Bayerns*, **9**, *1895.* — **Manouvrier,** *Platycnemie — Platymérie — Retroversion etc. Mém. Soc. d'Anthr. Paris 1888, 1889, 1893. Revue de l'Ecole 1892.* — **Derselbe,** *La Determination de la Taille etc Mém. Soc. Anthr. 1892.* — **Pfitzner,** *Variationen im Aufbau des Fußskelettes. Morph. Arbeiten*, **6**, *1896.* — **Derselbe,** *Morphologische Elemente des Handskelettes. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr.*, **2**, *1900.* — **Rosenberg,** *Wirbelsäule des Menschen usw. Verhandl. Anat. Ges. 1912 (Morph. Jahrb. 1895).* — **Sarasin,** *Wedda von Ceylon usw. Wiesbaden 1892—1893.* — **Verneau,** *Le Bassin. Paris 1875.* — **H. Virchow,** *Füße von Chinesinnen. Zeitschr. f. Ethnol. 1903, 1905 (demnächst selbständig. Bonn 1913).* — **Derselbe,** *Aufstellung des Fußskelettes. Anat. Anz.* **7**, *1892; Aufstellung des Handskelettes. Zeitschr. f. Ethnol. Verhandl. 1894; Einsetzen der Zähne nach Form, desgl. 1908.* — **Walkhoff,** *Das Femur des Menschen usw. Wiesbaden 1904.* — **Wetzel,** *Wirbelsäule der Australier. Zeitschr. f. Morph. u. Anthr.*, **12**, *1909 (vgl. auch* **13**, *1910).* — **Derselbe,** *Volum und Gewicht der Knochen. Arch. f. Entwicklungsmech.*, **30**, *1910.*

E. Fischer.

Schall.

1. Physikalische, physiologische, musikalische Akustik. Zur Lehre vom Schall im engeren Sinn oder zur physikalischen Akustik rechnet man zunächst die Lehre von denjenigen Vorgängen, die auf unser Ohr einwirken und Gehörempfindungen verursachen. Von ihr unterscheidet man die physiologische und psychologische Akustik, welche die Aufgabe haben, die Vorgänge im Ohre selbst bei Schallempfindungen bezw. bei der Wahrnehmung der Töne zu untersuchen.

An den Grenzgebieten gehen beide Teile ineinander über und sind schwer gegeneinander abzugrenzen.

Die Schallempfindung wird durch Luftwellen hervorgerufen, die das Ohr treffen und durch schwingende elastische Körper erzeugt werden; die physikalische Akustik ist demnach nichts anderes als ein Teil der Mechanik, nämlich die Lehre von den elastischen Schwingungen, soweit sie zur Erzeugung von Schallwellen und damit von Gehörempfindungen dienen. Auch hier sind jedoch die Abgrenzungen nicht scharf zu geben, und es ist z. B. üblich, zur physikalischen Akustik auch diejenigen Schwingungen zu rechnen, deren Schwingungszahl unter oder besonders auch über die menschliche Hörgrenze hinausgeht.

Die musikalische Akustik endlich beschäftigt sich mit dem ästhetischen Teil der Tonempfindungen, den Akkorden, der Harmonielehre usw. (s. den Artikel „Tonsysteme"). Hier soll wesentlich nur die physikalische Akustik behandelt werden.

2. Einteilung der Gehörempfindungen. Die Gehörempfindungen werden zunächst eingeteilt in Geräusche und Klänge. Das Charakteristische eines Geräusches ist das völlig Unregelmäßige, Schwankende, mehr oder weniger schnell Wechselnde der Schallempfindung, wie es etwa im Rollen des Donners, im Sausen des Windes, im Brauden des Meeres, im Plätschern des Baches usw. gegeben ist. Im Gegensatz hierzu nennt man eine Schallempfindung, die in jeder Beziehung gleichmäßig, ohne irgendwelche Schwankungen verläuft, wie sie etwa von einer angeschlagenen Klaviersaite, einer Stimmgabel, einer Pfeife, überhaupt von allen Musikinstrumenten geliefert wird, einen Klang.

Gelegentlich wird auch noch als dritte typische Schallempfindung der Knall als eine ganz kurze Gehörempfindung bezeichnet. Bei aufmerksamer Beobachtung gelingt es fast bei allen Geräuschen, aus ihnen Klänge herauszuhören, wie etwa das Heulen des Sturmes aus einem Klang besteht, der seine Tonhöhe stetig ändert. Es ist sehr wahrscheinlich, daß alle Geräusche nichts anderes

sind als Gemenge von Klängen, die in mehr oder weniger unregelmäßiger Weise ihre Elemente, Tonhöhe, Intensität, Dauer, wechseln, so daß Geräusch und Klangempfindung nicht prinzipiell voneinander verschieden sind. Ein Klang ist zunächst durch seine Stärke und seine Höhe als primäre Empfindungselemente charakterisiert. Bei gleicher Intensität und Höhe sind jedoch die Klänge einer Saite, einer Flöte, der menschlichen Stimme usw. noch deutlich durch ein weiteres Empfindungsmerkmal voneinander unterschieden, das man die Klangfarbe des betreffenden Klanges nennt. Unter den Klängen gibt es nun gewisse, die eine ganz besonders einfache ruhige Gehörempfindung liefern, wie etwa eine sanft angeschlagene Stimmgabel, eine schwach angeblasene Flasche. Diese Klänge haben etwas ungemein Weiches, sozusagen Uncharakteristisches; man bezeichnet sie im engeren Sinn als Töne.

Die Wellenlehre des Schalles in Verbindung mit der Ohm-Helmholtzschen Theorie des Hörens gibt eine in jeder Hinsicht befriedigende und ausreichende, wenn auch noch nicht ganz unbestrittene Erklärung für die diesen verschiedenen Gehörempfindungen zugrunde liegenden äußeren physikalischen und inneren physiologischen Vorgänge (vgl. auch die Abschnitte 9c, 13 und namentlich die Artikel „Klang" und „Gehörsinn").

3. Wesen des Schalles. Intensität. Tonhöhe. Sirene. In bezug auf die äußeren physikalischen Vorgänge, welche die Gehörempfindungen hervorrufen, hat sich folgendes ergeben.

Eine Klangempfindung wird hervorgebracht durch eine periodische, das Ohr treffende Luftbewegung, welche in einer Longitudinalwelle der Luft besteht. Die Intensität wächst mit der maximalen Elongation der schwingenden Luftteilchen. Die Tonhöhe hängt ab von der Dauer der Periode. Je kürzer die Periode, desto höher ist der Ton.

Daß der Schall durch die Luft, nicht etwa wie das Licht durch den Aether übertragen wird, lehrt der Versuch mit einer unter dem Rezipienten einer Luftpumpe zum Tönen gebrachten elektrischen Glocke. Wird die Luft ausgepumpt, so hört man die Glocke nicht mehr; ihr Ton kommt wieder, wenn die Luft wieder in den Rezipienten eingelassen wird.

Diese Sätze werden am einfachsten und anschaulichsten durch die sogenannten Sirenen bewiesen. Die Zahnradsirenen sind Scheiben aus Metall oder Holz, deren Rand mit äquidistanten Zähnen besetzt ist; wird gegen diese ein Kartenblatt oder dgl. gehalten, so wird beim Rotieren der Scheibe die Luft in gleichen Zeitintervallen beim Anschlag des Blattes gegen einen Zahn verdichtet, und dieser Verdichtungsstoß breitet sich nun wellenförmig in der Luft aus. In analoger Weise erfolgt die Lufterschütterung in periodisch einander folgenden Stößen bei der Lochsirene, die mit Löchern versehen ist, die in gleichen Abständen auf einem Kreise angebracht sind und mit einem Rohr angeblasen werden (Fig. 1).

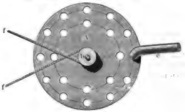


Fig. 1.

In präziser und zu Meßzwecken geeigneter Ausführung sind Lochsirenen von Cagniard la Tour und Helmholtz angegeben. Aus der Zahnzahl bezw. der Lochzahl und der Drehgeschwindigkeit läßt sich die in 1 Sekunde erfolgende Zahl der Luftstöße leicht ermitteln.

4. Allgemeines über Wellenausbreitung. In bezug auf die Gesetze der Wellenbewegung sei auf die Artikel „Wellenausbreitung" und „Welleninterferenz" verwiesen. Es sei hier nur das für das Folgende Nötigste gesagt.

Wird in einem elastischen Medium ein Teilchen in eine schwingende Bewegung versetzt, so werden von diesem Teilchen aus vermöge des elastischen Zusammenhanges aller Teilchen untereinander allmählich auch alle übrigen Teilchen dieselbe Bewegung ausführen, nur um so später, je weiter sie von dem ersten Teilchen entfernt sind. Ist die Bewegung des ersten Teilchens ein periodisches Hin- und Herschwingen um die Gleichgewichtslage, so ist es auch die Bewegung der übrigen Teilchen. Die Geschwindigkeit v, mit der die Ausbreitung dieser Bewegung erfolgt, die Geschwindigkeit der fortschreitenden Welle, hat einen bestimmten, von der Natur des Mediums abhängigen Wert. Die einzelnen Luftteilchen bleiben, abgesehen von der kleinen Schwingung um die Gleichgewichtslage, im wesentlichen an ihrer Stelle; nur die Bewegungsform schreitet fort. Die Dauer T einer vollen Schwingung eines Luftteilchens ist gleich dem reziproken Wert der in 1 Sekunde erfolgenden Schwingungen, der Schwingungszahl n. Die kleinste Entfernung zweier Teilchen, die sich gerade im gleichen Schwingungszustand, gleicher „Phase" der Bewegung befinden, etwa gerade durch die Normallage hindurch nach rechts schwingen,

heißt die Wellenlänge λ. Sie ist auch gleich dem Abstand zweier benachbarter Verdichtungen bezw. Verdünnungen bei Longitudinalwellen, gleich dem Abstand zweier benachbarter Wellenberge bezw. Wellentäler bei Transversalwellen. Es besteht die fundamentale Beziehung $v = \frac{\lambda}{T} = n\lambda$ sowohl für Longitudinalwellen, bei welchen die Schwingung der einzelnen Teilchen in der Richtung der Wellenfortpflanzung erfolgt und dadurch Verdichtungen und Verdünnungen des Mediums hervorruft, wie bei Transversalwellen, bei denen sie senkrecht dazu vor sich geht, und wo die Dichte keine Aenderung erfährt.

In Flüssigkeiten und Gasen sind nur Longitudinalwellen möglich, da sie nur gegen Verdichtung, nicht gegen seitliche Verschiebung einen elastischen Widerstand entwickeln; in festen Körpern, bei denen beide Verschiebungen elastische Reaktionskräfte wecken, sind dagegen sowohl Longitudinal- als auch Transversalwellen möglich.

Wird das Medium gleichzeitig von zwei Wellenzügen ergriffen, so ist die wirkliche Bewegung nach dem Prinzip der ungestörten Koexistenz kleiner Bewegungen einfach die Resultante der beiden Einzelbewegungen, ohne daß sich diese, sofern sie nicht zu stark sind, gegenseitig irgendwie stören und verändern. Auf die vielfachen hierdurch bedingten Erscheinungen der Akustik wird in Abschnitt 12 eingegangen werden. Hier sei nur der Spezialfall besprochen, der bei der Reflexion eines Wellenzuges beim Uebergang von einem Medium in ein anderes eintritt und zur Bildung der stehenden Wellen führt.

Ist das zweite Medium unendlich dicht gegen das erste — Reflexion am festen Ende —, so kehrt sich die Bewegungsrichtung, die „Phase" in die entgegengesetzte um. Ein Wellenberg kehrt als Wellental zurück und umgekehrt. Ist dagegen das zweite Medium unendlich dünn gegen das erste — Reflexion am freien Ende —, so bleibt die Bewegungsrichtung erhalten, Wellenberg kehrt als Wellenberg zurück. Setzt man nun nach dem eben angegebenen Prinzip den hingehenden und den reflektierten Wellenzug zusammen, so ist das Ergebnis eine sogenannte „stehende Welle".

Der fundamentale Unterschied gegen die fortschreitende Welle ist hier, daß die Berge und Täler bezw. die Verdichtungen und Verdünnungen nicht fortschreiten, sondern nur an derselben Stelle miteinander wechseln, daß ihr Ort „stehen" bleibt. Alle Teilchen gehen dabei gleichzeitig durch die Ruhelage und führen gleichzeitig ihre maximalen Exkursionen aus. Zwischen den Stellen der maximalen Bewegung, den „Bäuchen", liegen die „Knoten", wo die Teilchen dauernd in Ruhe bleiben. Der Abstand je zweier benachbarter Knoten, bezw. zweier Bäuche voneinander ist gleich der halben Wellenlänge der erregenden fortschreitenden Welle. Besonders zu beachten ist bei den stehenden Longitudinalwellen, daß die Knotenstellen, wo keine Bewegung stattfindet, die Stellen maximaler Druck- und Dichtigkeitsänderungen sind, während an den Bäuchen die stärksten Bewegungen, aber keine Dichtigkeits- und Druckänderungen auftreten.

5. Bezeichnung der Tonhöhe. 5a) Physikalische Bezeichnung. Physikalisch ist, wie schon erwähnt, die Tonhöhe vollständig bestimmt durch die Anzahl der in der Sekunde erfolgenden Schwingungen. Leider herrscht hierbei keine Einheitlichkeit, indem in Deutschland eine Hin- und Herschwingung zusammen als eine Schwingung gerechnet wird, „vibrations doubles" (=v.d.), während man sie in Frankreich getrennt als je eine Schwingung rechnet, nach vibrations simples (= v. s.) zählt, so daß also die Schwingungszahl in französischer Zählung das Doppelte von derjenigen in deutscher Zählung beträgt.

5b) Musikalische Bezeichnung der Tonhöhe. Tonleiter. Gleichschwebende Temperatur (s. Ausführliches hierüber in dem Artikel „Tonsysteme"). Für die Zwecke der Musik ist eine andere, dem psychologischen Moment entnommene Bezeichnung der Tonhöhe üblich, die auch in der physikalischen Akustik oft angewandt wird und deshalb hier kurz besprochen sei. Sie gründet sich auf die Empfindung der Konsonanz bezw. Dissonanz von zwei gleichzeitigen Tönen.

Aus den physikalisch unendlich vielen denkbaren Schwingungszahlen, die sich stetig aneinanderreihen, werden für musikalische Zwecke nur gewisse herausgegriffen, die durch endliche Stufen voneinander getrennt sind. Die Grunderscheinung ist zunächst, daß zwei Töne, deren Schwingungszahlen im Verhältnis 2 : 1 stehen, einen ganz außerordentlich großen Grad von Konsonanz haben, so daß der eine fast als Wiederholung des anderen, nur in anderer Tonhöhe, erscheint. Man sagt, sie stehen im Intervall der Oktave. Demgemäß werden beide mit demselben Buchstaben bezeichnet. Der tiefere heiße C, der höhere, seine Oktave, heißt dann c. Nächst dem Einklang 1 : 1 ist dieses das einfachste, ganzzahlige Schwingungszahlverhältnis. Verhalten sich die Schwingungszahlen wie 3 : 2, so ist ebenfalls ihre Konsonanz sehr groß, wenn auch nicht ganz so, wie im Fall der Oktave. Man nennt dieses Intervall die Quinte; die Quinte zu C wird mit G bezeichnet. Die nächstgute Konsonanz ist das Intervall

der großen Terz, wo das Schwingungszahlverhältnis 5 : 4 beträgt; die große Terz von C heißt E. Das Intervall der Quarte ist gegeben durch das Schwingungszahlverhältnis 4 : 3; zu C als Grundton führt es zu dem Ton F. So ergibt sich das Tonschema CEFGc mit den Schwingungszahlverhältnissen $1 : {}^5/_4 : {}^4/_3 : {}^3/_2 : 2$. CEG bilden den Dur-Akkord. Die Forderung der Musik, zu jedem Ton wieder den Dur-Akkord bilden zu können, führt zu neuen Tönen. Die Terz von G hat zu C das Schwingungszahlverhältnis ${}^3/_2 \cdot {}^5/_4 = {}^{15}/_8$; dieser Ton heißt die Septime von C, bezeichnet mit H. Die Quinte zu G hat zu C das Schwingungszahlverhältnis ${}^3/_2 \times {}^3/_2 = {}^9/_4 = 2\,{}^1/_4$, fällt mithin über die Oktave c hinaus; seine nächst niedere Oktave hat zu C also das Schwingungszahlverhältnis ${}^9/_8$, die Sekunde von C, mit D bezeichnet. Die große Terz von F hat zu C das Schwingungszahlverhältnis ${}^4/_3 \times {}^5/_4 = {}^5/_3$; dieser Ton heißt A und wird als Sexte von C bezeichnet. Von C als Grundton ausgehend, erhält man so bis zur Oktave folgende Tonreihe, die sogenannte diatonische Tonleiter:

C	D	E	F	G	A	H	C
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2

$$\tfrac{9}{8} \quad \tfrac{10}{9} \quad \tfrac{16}{15} \quad \tfrac{9}{8} \quad \tfrac{10}{9} \quad \tfrac{9}{8} \quad \tfrac{16}{15}$$

Die erste Reihe enthält die musikalische Bezeichnung des Tones, die zweite seine Schwingungszahl, bezogen auf diejenige des Grundtones C als Einheit, die dritte die Schwingungszahlverhältnisse, Intervalle, je zweier aufeinanderfolgender Töne. Diese sind, wie man sieht, sehr ungleich. Man hat deshalb, außer zwischen den das kleinste Intervall enthaltenden Tonpaaren E-F und H-C, zwischen je zwei andere benachbarte noch einen Zwischenton eingefügt, wodurch man die chromatische, aus 12 Tönen bestehende Tonleiter erhält. Die Wahl dieser Zwischentöne kann nun sehr verschieden erfolgen. Will man, was das natürlichste ist, diese Töne so wählen, daß man von jedem Ton der diatonischen Tonleiter ausgehend wieder genau dieselbe Tonleiter mit denselben Intervallen erhalten kann, so ist die Einschiebung neuer Töne nötig; um von dieser wieder die Tonleiter bilden zu können, sind abermals neue Töne erforderlich, so daß eine außerordentlich große, streng genommen unendlich große Zahl von Tönen resultiert.

Im Hinblick auf die Zwecke der praktischen Musik, wo namentlich bei Instrumenten mit festliegenden Tönen, wie etwa beim Klavier, die Zahl dieser Töne eine gewisse Grenze nicht überschreiten darf, ohne zu großer Unhandlichkeit zu führen, hat man die Zahl der Töne in der Oktave auf 12 festgelegt und wählt sie in der jetzt allgemein angenommenen gleichschwebenden Temperatur oder temperierten Stimmung so, daß Grundton und Oktave, bei denen das Ohr gegen eine Verstimmung am empfindlichsten ist, genau das Schwingungszahlverhältnis 1 : 2 haben, während die übrigen Töne so gewählt sind, daß das Schwingungszahlverhältnis, Intervall, je zwei aufeinander folgender Töne gleich groß ist. Dieses Intervall ist also

$$\sqrt[12]{2} = 1{,}05946.$$

Außer der Oktave sind zwar hierbei alle Intervalle, namentlich die Terz, etwas unrein, aber trotzdem ist diese temperierte Stimmung aus vielen Gründen für die praktische Musik wohl die glücklichste Lösung der Schwierigkeiten.

Als Grundlage für die Stimmung, d. h. die Größe der absoluten Schwingungszahlen, ist 1885 durch internationalen Beschluß der sogenannte „Kammerton" mit 435 v. d. in der Sekunde als das eingestrichene a festgelegt. Das nächst höhere c heißt das zweigestrichene c, darauf folgt das drei-, viergestrichene usw. c. Nach abwärts folgt das eingestrichene kleine, große, Kontra- und Subkontra-C; letzteres hat 16,17 v. d. Leider sind die Oktavenbezeichnungen nicht einheitlich, es sind mehrere im Gebrauch.

Neben der internationalen Stimmung gibt es noch die physikalische Stimmung, bei welcher das Subkontra-C genau 16 v. d. hat, was bei Rechnungen Vorteile bietet.

In der Musik werden nur Töne zwischen etwa 16 v. d. (ausnahmsweise) und etwa 4000 v. d., rund 8 Oktaven gebraucht. Die darüber liegenden Töne sind musikalisch unbrauchbar, weil von hier an das Intervallschätzungsvermögen aufhört und diese hohen Töne schmerzhaft stechende Empfindungen bewirken.

6. Tonquellen. 6a) Feste Körper. 1) Transversalschwingungen. α) Saiten. Sehr einfache, zum Teil schon im Altertum bekannte Gesetzmäßigkeiten herrschen bei den stehenden Transversalschwingungen von Saiten. Als Saiten bezeichnet man Fäden oder Drähte, die erst durch künstliche Spannung Elastizität bekommen, d. h. einen elastischen Widerstand gegen Entfernung aus ihrer Normallage leisten. Bringt man eine Saite durch Zupfen oder durch Schlagen aus ihrer Gleichgewichtslage, so erhalten die einzelnen Teile der Saite wesentlich Verschiebungen senkrecht zur Längsrichtung der Saite; die Saite wird verbogen und gedehnt; die hierdurch geweckten elastischen Spannungskräfte ziehen sie beim Loslassen wieder in die Ruhelage zurück, die sie aber vermöge der Trägheit wie beim Pendel nach der anderen Seite überschreitet, wodurch von neuem die elastischen rück-

treibenden Kräfte geweckt werden usw.; es entstehen regelmäßige Transversalschwingungen. Die beiden Enden der Saite sind natürlich stets befestigt. Bei der einfachsten Schwingungsform (Fig. 2) schwingt

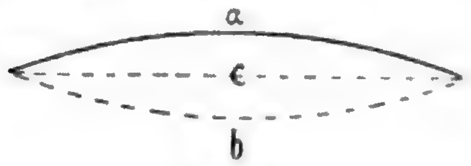


Fig. 2.

die Saite zwischen den beiden Grenzlagen a und b hin und her. Ist P das spannende Gewicht, l die Länge der Saite, q ihr Querschnitt, σ ihre Dichte, so ist die Schwingungszahl dieser einfachsten Schwingung, des Grundtones:

$$n = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{P}{q\sigma}}$$

Die Schwingungszahl des Grundtones ist also umgekehrt proportional der Länge und proportional der Quadratwurzel aus dem spannenden Gewicht. Spannt man die Saite z. B. mit Gewichten, die sich verhalten wie $4^2 : 5^2 = 16 : 25$, nahezu 2 : 3, so stehen die entsprechenden Schwingungszahlen im Verhältnis 4 : 5, d. h. im Intervall der großen Terz.

Obertöne einer Saite. Eine Saite kann außer in ihrem Grundton, wobei alle Punkte außer den beiden befestigten Endpunkten in Bewegung sind, auch so schwingen, daß einzelne Punkte auf ihr dauernd in Ruhe, Knotenpunkte, sind, und zwar so, daß sie durch diese in eine Anzahl gleich langer Stücke geteilt wird, in 2, 3, 4... usw. Stücke, wobei also sukzessive die Knotenpunkte in der Mitte, auf ein und zwei Drittel der Saite liegen usw., so daß also folgende Schwingungen resultieren (Fig. 3).

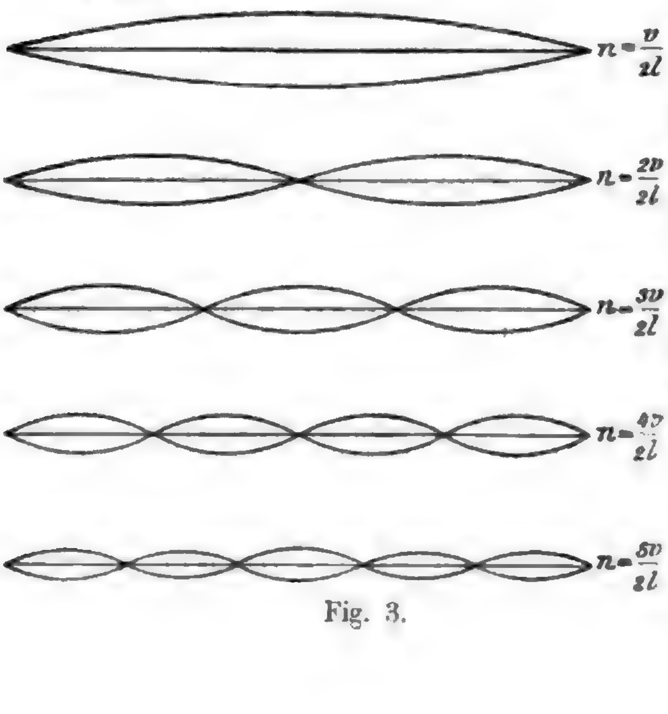


Fig. 3.

Die diesen Schwingungsformen entsprechenden Schwingungszahlen sind 2, 3, 4... mal so groß als die des Grundtones, da ja die Länge des Saitenstückes zwischen zwei Knoten, 2, 3, 4... mal so kurz ist als beim Grundton. Man nennt diese Töne die harmonischen Obertöne der Grundtöne, alle möglichen Töne zusammen die Partialtöne. Man kann sie bei der Saite leicht durch Berühren eines entsprechenden Knotenpunktes mit dem Finger erhalten und die Knotenpunkte und Bäuche durch aufgesetzte Papierreiterchen nachweisen, die an den Bäuchen abgeworfen werden, an den Knoten liegen bleiben.

Komplizierte Schwingungsformen können durch gleichzeitiges Bestehen mehrerer Partialtöne auf der Saite entstehen, wobei sich die einzelnen Schwingungsarten einfach überlagern, und je nach Anzahl und Amplitude der einzelnen Partialschwingungen sehr verschiedene komplizierte Schwingungsformen entstehen können.

Von dieser Schwingungsform hängt allgemein, wie Helmholtz, damit ein altes Rätsel lösend, gezeigt hat, die Klangfarbe ab, die durch die Intensität bedingt ist, mit der die verschiedenen Partialtöne im Klang vertreten sind (vgl. den Artikel „Klang").

Die Anregung der Saite kann durch Zupfen (Zither), durch Schlagen (Klavier) oder durch Streichen (Violine) erfolgen. Beim Zupfen wird die Saite zunächst aus ihrer Ruhelage herausgebracht und dann losgelassen; es ist also zu Anfang eine gegebene Verrückung der Saite, aber keine Geschwindigkeit vorhanden. Beim Schlagen wird mit einem Hämmerchen einem bestimmten Teil der Saite eine gewisse Geschwindigkeit erteilt, so daß also zum Beginn eine Geschwindigkeitsverteilung vorgeschrieben ist. Je nach Art und Ort der Anregung entstehen sehr verschiedene Schwingungsformen der Saite und damit verschiedene Klangfarben. Wir verdanken Helmholtz und W. Kaufmann, sowie Krigar-Menzel und Raps genaue Untersuchungen hierüber. Es muß hier der Hinweis auf diese im einzelnen sehr interessanten Versuche genügen.

Ist die Länge nicht mehr sehr groß gegen den Querschnitt, so ist noch der Einfluß der Eigenelastizität der Saite zu berücksichtigen, der sogenannten Steifigkeit, die den Ton höher macht, insbesondere die hohen Obertöne.

β) Membranen. Die Membranen sind den Saiten ganz analoge Gebilde, insofern sie Körper, dünne Häutchen, sind, die erst durch Spannung elastischen Widerstand gegen Entfernung aus einer Normallage erhalten; nur sind es im Gegensatz zu den

eindimensionalen Saiten zweidimensionale Gebilde. Sie zeigen eine entsprechend größere Mannigfaltigkeit von Schwingungsformen.

An Stelle der Knotenpunkte bei den Saiten treten hier Knotenlinien, die bei beliebiger befestigter Begrenzung der Membran sehr komplizierte Form haben. Für eine kreisförmige, am Rande befestigte Membran sind die möglichen Knotenlinien konzentrische Kreise und Radien, die gleiche Winkel miteinander bilden. Die entsprechenden Schwingungszahlen stehen aber nicht wie bei den Saiten in ganzzahligem Verhältnis zueinander; die Obertöne sind unharmonisch zum Grundton, bei dem nur der feste Kreisrand Knotenlinie ist, und liegen auch sehr nahe beieinander. Der Größe nach geordnet und auf den tiefsten als 1 bezogen sind die Partialtöne bei kreisförmigem Rand innerhalb der ersten zwei Oktaven folgende 10 Töne:

1,00, 1,59, 2,14, 2,30, 2,65, 2,92, 3,16, 3,50, 3,60, 3,65.

Nach der von Chladni erfundenen Methode können die Knotenlinien durch aufgestreuten Sand sichtbar gemacht werden, der sich auf ihnen ansammelt.

Von besonderem Interesse für die Theorie des Hörens, insbesondere für die Helmholtzschen Resonanztheorie des Hörens, ist eine Membran, deren Begrenzung ein gleichschenkliges Dreieck mit spitzem Winkel ist, und das parallel der dritten Seite sehr viel stärker gespannt ist als senkrecht dazu. Eine derartige Membran ist die Basilarmembran in der Schnecke des Ohres. Nach Helmholtz schwingt eine solche Membran so, wie eine Reihe nahe voneinander unabhängiger Einzelfasern parallel der dritten Dreieckseite (s. Näheres im Artikel „Gehörsinn").

Wie bei Saiten, tritt auch bei Membranen die Eigenelastizität, Steifigkeit, zur Spannungselastizität hinzu, wodurch die wirklichen Schwingungszahlen höher sind als die berechneten. In der Musik werden Membranen bei der Trommel, der Pauke, dem Tamburin verwendet.

γ) Stäbe. Im Gegensatz zu den Saiten sind Stäbe Körper mit Eigenelastizität, die in ihnen bereits ohne äußere Spannung bei Verbiegung eine in die Normalform zurücktreibende Kraft weckt, die Anlaß zu Schwingungen um die natürliche Gestalt gibt. Die Schwingungszahl der Transversal-, Biegungsschwingungen hängt ab von dem Elastizitätsmodul, der Länge, der Dichte und den Querschnittsdimensionen des Stabes, ferner von der Befestigungsart des Stabes wo wesentlich die drei Fälle in Betracht kommen: Beide Enden frei; beide Enden fest; ein Ende fest, das andere frei. Für den Stab mit beiderseits freien Enden sind folgende Schwingungsformen mit 2, 3, 4... Knoten möglich (Fig. 4); die verschiedenen

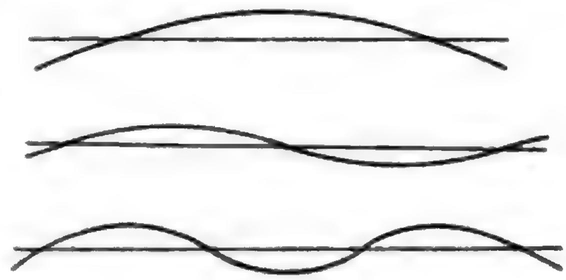


Fig. 4.

Teiltöne sind sämtlich unharmonisch zueinander. Angenähert verhalten sich jedoch die höheren wie die Quadrate der ungeraden Zahlen. Als besonderen Unterschied gegen die Saitenschwingungen sei hervorgehoben, daß hier die Schwingungszahl umgekehrt proportional dem Quadrat der Länge ist. Die Knoten befinden sich beim Grundton nicht genau in $^1/_4$ und $^3/_4$ der Stablänge, sondern, vom einen Ende an gerechnet und die Länge des Stabes gleich 1 gesetzt, an den Stellen 0,224 und 0,776.

Sind die Querschnittsdimensionen nicht sehr klein gegen die Länge und ist diese ebenfalls klein, so werden die Schwingungszahlen sehr hoch; Rudolf König hat solche kurzen dicken Stäbe von kreisförmigem Querschnitt aus Stahl, Klangstäbe, zur Erzeugung sehr hoher, auch über der oberen Hörgrenze liegender Töne benutzt.

Von besonderem Interesse sind die Schwingungen gekrümmter Stäbe, weil die in der Akustik so viel gebrauchten Stimmgabeln nichts anderes als eben solche gekrümmten Stäbe mit zwei freien Enden sind, deren Mitte durch einen Ansatz, den Stiel der Stimmgabel, verdickt ist. Ueber die Schwingungsform der Stimmgabel hat man (Chladni) lange die Vorstellung gehabt, daß sie im wesentlichen derjenigen der gestreckten geradlinigen entspricht, daß also beim Grundton die Schwingung so erfolgt wie in Figur 5 dargestellt, wobei die Knoten nahe

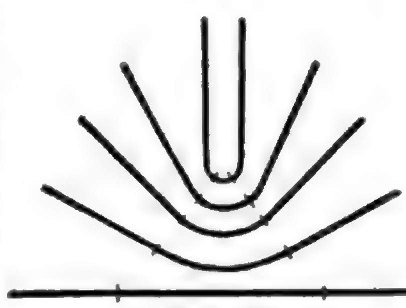


Fig. 5a.

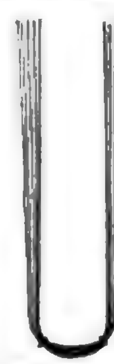


Fig. 5b.

dem Stiel liegen. Es hat sich jedoch bei neueren Untersuchungen von Quix und Struycken ergeben, daß die Verhältnisse in Wirklichkeit nicht ganz so einfach liegen. Wohl infolge nie ganz zu vermeidender kleiner (und auch für langes Schwingen der Gabel nützlicher) Asymmetrieen ist die Schwingung ungefähr so, als ob der Stiel und die eine Zinke zusammen wie ein gerader Stab schwingen, an dem nun noch die zweite Zinke gekoppelt ist, die ebenfalls als gerader Stab schwingt. Es erfolgt nicht, wie man meinen sollte, die Schwingung des Stielendes senkrecht zu derjenigen der Zinkenenden, sondern ihnen parallel. Es gibt ferner nur eine einzige Knotenstelle der Gabel, in einer der beiden Zinken nahe dem Stiel, wo wirklich in aller Strenge keine Bewegung stattfindet, nicht zwei, wie nach der älteren Auffassung; in dem symmetrisch gelegenen Punkt ist die Bewegung zwar klein aber nicht direkt Null. Ein großer Vorteil der Stimmgabeln ist, daß die Obertöne unharmonisch und schwach, sowie sehr weit ab vom Grundton liegen und schnell verklingen.

Die Schwingungszahlen der besonders in Betracht kommenden Obertöne sind, bezogen auf den Grundton als 1 : 6,2, 18,3, 35; der erste Oberton liegt also schon über 2 Oktaven über dem Grundton.

Mit Sicherheit ist außer diesen unharmonischen Obertönen stets, wenn auch schwach, die Oktave festgestellt worden. Ihre Entstehung ist nach Lindig folgende: Die Konfiguration der Stimmgabel bringt es mit sich, daß die elastische, die Luftteilchen in die Ruhelage zurücktreibende Kraft nicht einfach der Entfernung x aus der Ruhelage proportional ist, sondern die Form $ax \times bx^2$ hat, also unsymmetrisch in bezug auf die Richtung des Ausschlages ist. In diesem Fall entsteht, wenn b groß ist, auch schon bei kleiner Elongation x, wie Helmholtz gezeigt hat, in der Luft nicht nur der Grundton, sondern auch die Oktave. Lindig nennt diese Töne Asymmetrietöne.

Stimmgabeln eignen sich wegen ihrer Dauerhaftigkeit und wegen des Umstandes, daß ihre Schwingungszahl von der Größe der Elongation praktisch unabhängig ist, hervorragend zu Schwingungszahlnormalen. Um die an und für sich nur schwache Abgabe der Stimmgabelschwingungen an die Luft zu verstärken, schraubt man den Stiel in den Deckel eines an einer oder zwei Seiten offenen Kastens, des Resonanzkastens, dessen Luftvolumen in seiner Eigenschwingung auf den Stimmgabelton abgestimmt ist (s. „Resonanz" im Abschnitt 11).

Den Zweck lang anhaltender automatischer Anregung bei großer Elongation erfüllt die elektromagnetische Stimmgabel (Helmholtz). Ein an einer Zinke befestigter metallischer Stift taucht in einen Quecksilbernapf, wodurch ein elektrischer Strom geschlossen wird, der um ein zwischen den Zinken befindliches Stück weichen Eisens gehend dieses zu einem Magneten macht, so daß die Zinken zusammengehen. Hierdurch wird der Stift aus dem Napf herausgehoben, der Strom geöffnet, die Zinken gehen wieder auseinander, der Stift taucht wieder in das Quecksilber und das Spiel beginnt von neuem.

δ) Platten. In wesentlich zwei Dimensionen sich erstreckende feste Körper mit Eigenelastizität. Die Schwingungszahlen der Eigentöne der Platten hängen vom Elastizitätsmodul, der Dichte, der Dicke, der Form der Randkurve und der Art der Befestigung ab. Die Obertöne sind auch hier alle unharmonisch zum Grundton. Bei kreisförmiger Begrenzung sind die Knotenlinien natürlich wie bei Membranen Durchmesser und konzentrische Kreise. Melde hat für sehr hohe Töne bis über die obere Hörgrenze an Stelle der Stimmgabeln solche kreisfömigen Platten aus Stahl, „Stimmplatten", benutzt. Daß die Platten wirklich schwingen, auch wenn ihre Schwingungszahl so hoch liegt, daß sie nicht mehr als Ton gehört wird, erkennt man an dem Auftreten der Chladnischen Klangfiguren, die sich hier ganz besonders zum Studium der Schwingungsart eignen.

In sehr zierlicher Form lassen sich diese leicht auf kleinen mikroskopischen, mit Sand bestreuten Deckgläschen dadurch herstellen, daß man sie auf ein weitmaschiges Drahtnetz legt, unter dem sich eine Galtonpfeife zur Erzeugung sehr hoher Töne befindet; verändert man die Tonhöhe derselben stetig, so bildet sich immer, wenn der Ton der Pfeife mit einem Eigenton des Deckgläschens übereinstimmt, die entsprechende Chladnische Klangfigur aus (F. A. Schulze), wovon Figur 6 einige Beispiele gibt.

In ähnlicher Beziehung wie die Stimmgabel als gebogener Stab zu den geraden Stäben stehen die Glocken als gekrümmte Platten zu den ebenen Platten; sie führen also im ganzen auch ähnliche Schwingungen aus mit analogem System von Knotenlinien. Sie haben oft die Eigentümlichkeit, daß nicht der Grundton der stärkste Ton ist, sondern irgendein anderer der Obertöne, der als Hauptton der Glocke erscheint.

2) Longitudinalschwingungen (von Stäben). Diese durch Längsreiben mit einem mit Kolophonium bestrichenen (bei Metallstäben) oder mit Wasser getränkten (bei Glasstäben) Lappen hervorgebrachten Schwingungen befolgen wesentlich einfachere Gesetze als die Transversalschwingungen. Ist die Mitte festgeklemmt, die Enden frei, so ist beim Grundton die Mitte ein

Knotenpunkt, die Enden Bäuche der im Stab erzeugten stehenden Longitudinalschwingung. Die ganze Länge l des Stabes ist also eine halbe Wellenlänge der erregenden Welle. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v von Longitudinalwellen hängt nur vom Elastizitätsmodul E und der Dichte d ab nach der Formel

$$v = \sqrt{\frac{E}{d}}$$

Nach der allgemeinen Beziehung $n = \frac{v}{\lambda}$ ist also die Schwingungszahl

$$n = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{E}{d}}$$

Die nächst mögliche Schwingungsart des Stabes ist die, daß in der Mitte und an den Enden Bäuche der stehenden Welle sind.

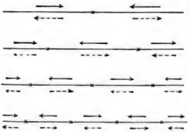


Fig. 7.

Die Knoten liegen dann in $^1/_4$ und $^3/_4$ der Stablänge. Die Schwingungszahl ist dann doppelt so groß als beim Grundton. Es folgt dann eine Schwingung, bei der in der Mitte und in $^1/_6$ und $^5/_6$ der Stablänge Knoten liegen; die Schwingungszahl ist die dreifache derjenigen des Grundtones usw.

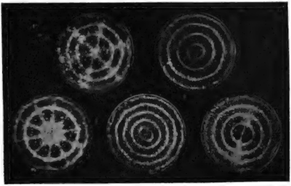


Fig. 6.

Allgemein sind außer dem Grundton alle harmonischen Obertöne möglich. Die Figur 7 stellt für den Grundton und die ersten drei Obertöne diese Schwingungen dar. Die Pfeile geben die Schwingungsrichtungen an, die Kreuze die Knotenstellen.

Ist ein Ende fest, das andere frei, so ist dieses stets ein Bauch, jenes stets ein Knoten der stehenden Schwingung. Ist kein weiterer Knoten vorhanden, so haben wir den Grundton; bei diesem ist also die ganze Länge l des Stabes gleich $\frac{\lambda}{4}$, die Schwingungszahl mithin $n = \frac{1}{4l}\sqrt{\frac{E}{d}}$, also nur halb so groß als im vorigen Fall bei gleicher Länge des Stabes. Die nächst mögliche Schwingung ist derartig, daß noch ein Knoten in $^2/_3$ der Länge des Stabes vom festen Ende an gerechnet vorhanden ist; die entstehende Schwingungszahl ist $n = 3 \cdot \frac{1}{4l}\sqrt{\frac{E}{d}}$, also das Dreifache des Grundtones. Allgemein sind in diesem Falle die möglichen Obertöne alle ungeradzahligen harmonischen Obertöne des Grundtones. Figur 8 gibt die Schwingungsformen für Grundton, ersten und zweiten Oberton.

Auch gespannte Saiten geben in analoger Weise Longitudinalschwingungen. Natürlich sind hier die Enden stets fest, also Knotenpunkte der Schwingung.

In der Musik werden diese Töne nicht

verwendet; dagegen sind diese Longitudinaltöne, da sie bei der gleichen Länge wesentlich höher sind als die Transversaltöne, sehr gut zur Erzeugung sehr hoher Töne und zur

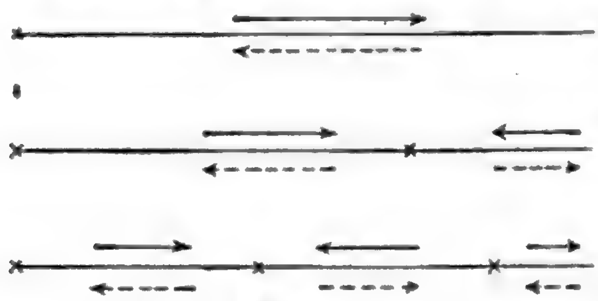


Fig. 8.

Bestimmung der oberen Hörgrenze zu verwenden (F. A. Schulze). Die Schwingungszahl der Longitudinaltöne ist im Gegensatz zu den Transversalschwingungen in weiten Grenzen ganz unabhängig von der Größe der Spannung.

Ueber die Verwendung der Longitudinalschwingungen von Stäben zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in Gasen und festen Körpern siehe im Abschnitt 8.

Die Knoten schwingender Glasstäbe lassen sich, wie Biot gezeigt hat, nachweisen, indem man sie zwischen zwei gekreuzte Nicolsche Prismen bringt, deren Polarisationsebene einen Winkel von 45° mit der Längsrichtung des Stabes bildet. Beim Tönen erfolgt an den Knotenstellen Aufhellung des Gesichtsfeldes.

6b) Gase. *α*) Lippenpfeifen. Die Theorie der Longitudinalschwingungen in Gasen — nur solche sind in Gasen möglich —, in zylindrischen Räumen, deren Querschnittsdimensionen klein gegen ihre Länge sind — den Pfeifen —, ist genau dieselbe wie diejenige von Longitudinalschwingungen in Stäben. Die Resultate können im wesentlichen übernommen werden. Dem festgeklemmten Ende des Stabes entspricht das geschlossene, gedeckte Ende der Pfeife, dem freien Stabende das offene Ende der Pfeife. Eine beiderseits offene Luftsäule — die offene Pfeife — gibt also sämtliche harmonischen Teiltöne, eine an einem Ende geschlossene, am anderen offene Luftsäule — eine gedeckte Pfeife — nur die ungeraden harmonischen Teiltöne. Ist v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft (s. hierüber Näheres im Abschnitt 8), m eine der ganzen Zahlen 1, 2, 3, . . . , l die Länge der Pfeife, so sind die Schwingungszahlen für die gedeckte Pfeife

$$n = \frac{2m-1}{4l} v,$$

für die offene Pfeife

$$n = \frac{m}{2l} \cdot v.$$

Wie bei Stäben ist also die Schwingungszahl der Pfeifenlänge umgekehrt, der Schallgeschwindigkeit direkt proportional. Bei gleicher Länge hat der Grundton der offenen Pfeife die doppelte Schwingungszahl wie derjenige der gedeckten Pfeife.

Da sich v in Gasen stark mit der Temperatur ändert, so ändert sich entsprechend auch die Schwingungszahl mit der Temperatur und zwar pro Grad etwa 2 pro Mille; bei 25° C ist demnach der Ton etwa eine kleine Sekunde höher als bei 0°. Die zu einer bestimmten Schwingungszahl und Temperatur gehörige Pfeifenlänge ist aus der Formel leicht zu ermitteln. Bei 0° (v = 332 m pro sec.) wird das Normal-a = 435 v. d. von einer gedeckten Pfeife von etwa 19 cm angegeben.

An den so berechneten Größen ist jedoch bei offenen Pfeifen eine sehr wesentliche Korrektion für das offene Ende anzubringen. Die wirklichen Schwingungszahlen sind kleiner als die berechneten. Es liegt dies daran, daß das offene Ende nicht genau ein Bauch der stehenden Luftwelle ist. Der Uebergang aus der einseitigen Bewegung längs der Pfeifenachse in die allseitige konzentrische Kugelwelle außerhalb der Pfeife erfolgt nicht sprungweise, sondern allmählich. Die Verdichtung und Verdünnung am offenen Ende ist nicht stets Null, wie es bei einem Bauch einer stehenden Welle der Fall ist. Wohl ist die Dichte der Luft innen und außen am offenen Ende stets gleich groß, da aber die äußere Luft selbst schwingt und Verdichtungen und Verdünnungen hat, so schwankt auch die Dichte am offenen Ende dementsprechend.

Die der Tonhöhe entsprechende Pfeifenlänge, die reduzierte Pfeifenlänge, ist also etwas größer als die wirkliche Länge, nach Helmholtz etwa um $^1/_3$ des Rohrdurchmessers.

Nach der Art der Anregung unterscheidet man Lippenpfeifen und Zungenpfeifen. Die Lippenpfeifen, Figur 9, sind folgendermaßen konstruiert. Die Luft strömt aus der Zuführung durch a in die „Luftkammer" b, von dort durch die enge „Kernspalte" d über das „Maul" f gegen die Schärfe der „Oberlippe" g; e heißt die „Unterlippe" oder „Vorschlag", c der „Kern".

Ueber die Art und Weise, in welcher der zunächst aus dem Anblasespalt kommende Luftstrom die Schwingungsbewegung einleitet und erhält, haben die Ansichten mehrfach geschwankt. Die eine Ansicht ist die, daß das aus dem Spalt kommende Luftblatt zunächst eine Verdichtung in die Pfeife schickt, wodurch in dieser stehende Schwingungen erzeugt werden. An dem offenen Ende bei f ist ein Bauch dieser Schwingung, die Luft geht dort entsprechend abwechselnd in die Röhre hinein und hinaus; in dem Moment, wo die Oszillation der Luft in der Pfeife die Luft am offenen Ende eintreten läßt, wird dadurch auch das Luftblatt nach innen geneigt, wie etwa eine Flamme durch einen sie treffenden Luftstrom bewegt wird, und die ganze Luftmenge dieses Luftblattes

in die Pfeife hineingetrieben. In der nächsten Schwingungsphase hingegen, bei der die Luft an der Mündung aus der Pfeife austritt, wird das Luftblatt nach außen geworfen usw. Auf diese Weise werden die Schwingungen durch den Luftstrom dauernd unterhalten.

Nach einer anderen Ansicht ist in dem Anblasegeräusch eine große Menge von Tönen verschiedener Schwingungszahl enthalten, aus der durch Resonanz der dem Eigenton der Pfeife entsprechende aus-

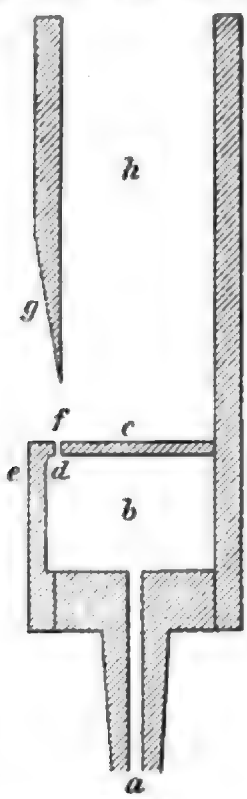


Fig. 9.

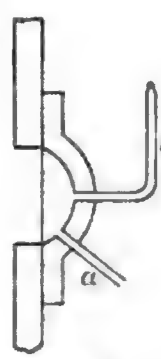


Fig. 10.

gewählt und verstärkt wird. Wachsmuth sieht die Anregung darin, daß zunächst der gegen den Keil der Oberlippe antreffende Luftstrom hier den sogenannten Schneidenton erzeugt, der also auch ohne das Resonanzrohr der Pfeife stets entsteht. Das am Keil angesetzte Resonanzrohr bewirkt nun, daß der Schneidenton, der in seiner Höhe vom Schneidenabstand in komplizierter Weise abhängt und auch in seiner Höhe durch äußere Einwirkungen etwas modifiziert werden kann, sich in seiner Höhe dem Eigenton der Resonanzröhre anpaßt, und diese Töne verstärken sich nun wechselseitig, bis beide in gleichem Tempo schwingen.

Kubische Pfeifen. Sind die Querschnittsdimensionen der Pfeife nicht mehr klein gegen die Länge der Pfeife, so ist die Schwingungszahl kleiner als sie nach den angegebenen Formeln sein müßte. Man nennt solche Pfeifen kubische. Ihre Schwingungszahl ist, wenn S das Volumen, s die (kleine) Oeffnung der Pfeife ist, nach Helmholtz

$$n = 56174 \frac{\sqrt{s}}{\sqrt{S}}.$$

Die Experimente haben diese Formel gut bestätigt.

Soll eine Pfeife sehr hohe Töne geben, so muß man also außer der Verringerung der Länge auch den Querschnitt entsprechend verkleinern, damit die Pfeife nicht „kubisch" wird. Eine solche hat demnach sehr kleine Dimensionen; sie ist verwirklicht in der Galtonpfeife; es ist dies eine gedeckte Pfeife von nur 7 mm Durchmesser, deren Länge durch einen verschiebbaren Stempel verändert werden kann; der Anblasespalt ist ringförmig. Die Pfeife ist sehr handlich und liefert mit Gummiball oder besser mit konstantem Winddruck angeblasen sehr intensive hohe, auch weit über der oberen Hörgrenze liegende Töne (bis zu 50000 bis 600000 v. d.).

Zum Nachweis der Knoten in einer tönenden Pfeife dienen die von R. König angegebenen Membrankapseln (Fig. 10). Ein Loch in der Seitenwand der Pfeife ist durch ein dünnes Kautschukhäutchen verschlossen. Auf dieser ist eine Kapsel befestigt, die ein Gaszuführungsrohr a und ein Brennerrohr b hat. Wird das Gas entzündet, so wird, wenn sich die Kapsel an einem Knoten befindet, das Gas abwechselnd in die Kapsel ein- und ausgetrieben, die Flamme brennt also abwechselnd hoch und niedrig; in einem rotierenden Spiegel betrachtet zeigt sich demnach das Flammenbild in eine Reihe von Zacken aufgelöst, während es an einem Bauch ein gleichmäßig dickes Band bleibt.

Zur Demonstration der Druckverhältnisse in tönenden Pfeifen benutzte Kundt sogenannte Ventilmanometer, kleine Gummimembranen, die über einen etwa 1 mm breiten und 4 bis 10 mm langen Schlitz in einer Messingplatte gespannt sind, auf diese ist ein gewöhnliches Wassermanometer aufgesetzt. Befestigt man den Apparat über einem Loch in der Pfeifenwand, so wird an einem Knoten vermöge der Ventilwirkung die Verdichtung am Steigen des Manometers sichtbar. Neuerdings ist es auch gelungen, die periodischen Temperaturschwankungen der Luft an einem Knoten durch die entsprechenden, in demselben Tempo erfolgenden Schwankungen des elektrischen Widerstandes eines sehr dünnen Metalldrahtes von äußerst geringer thermischer Trägheit messend zu verfolgen.

β) Singende Flammen. Sensible Flammen. Eine beiderseits offene Luftsäule kann durch eine kleine Gasflamme, die im Innern nahe dem unteren Ende brennt, zum Tönen gebracht werden, wobei, wie die Betrachtung im rotierenden Spiegel lehrt, die Flamme im Takt der Schwingung auf und ab zuckt. Das Tönen erfolgt am besten bei einer

bestimmten Flammenhöhe; tritt das Tönen nicht ein, so kann man es oft erzwingen, indem man von außen denselben Ton angibt; das Tönen der Luftsäule bleibt dann auch bestehen, wenn der erregende Ton aufhört.

Eine sehr eigentümliche in ihrer Entstehung noch nicht genügend aufgeklärte Erscheinung ist die sogenannte sensible oder empfindliche Flamme. Brennt eine Leuchtgasflamme aus einer kleinen Oeffnung in einem engen Rohr unter starkem Druck, etwa 25 cm Wasser, wobei sie eine schlanke Zunge von etwa 40 cm Höhe bildet, so zuckt sie unter gleichzeitiger Verbreiterung stark zusammen, wenn die Schallwellen eines Tones von genügend großer Schwingungszahl auf sie auftreffen. Besonders wirksam sind sehr hohe Töne, wie sie etwa von einer Galtonpfeife oder einem rasselnden Schlüsselbund, Zischen, Pfeifen usw. ausgehen. Die Wirkung erstreckt sich auf viele Meter. Von besonderem Interesse und für die Erklärungsversuche wichtig ist, daß sie in einer stehenden Welle nicht wie das Ohr in den Knoten, sondern an den Bäuchen am meisten affiziert wird (Rayleigh).

Von den Lippenpfeifen wesentlich verschieden sind die Zungenpfeifen. Ihre Besprechung gehört eigentlich nicht hierher, sondern zu den Schwingungen von Stäben; es ist aber meist üblich, sie an die Lippenpfeifen anzuschließen. Sie enthalten als wesentlichen Bestandteil ein an einem Ende befestigtes Metallblatt, das über einer Oeffnung im Anblaseraum befestigt ist und ihn in der Ruhelage abschließt. Man unterscheidet durchschlagende und aufschlagende Zungen (Fig. 11 a u. b), je

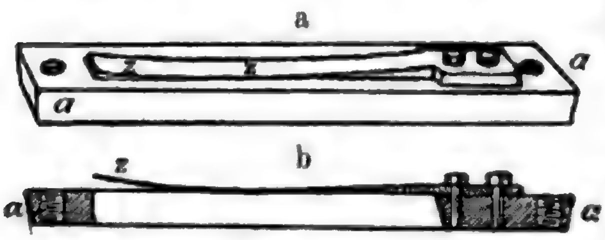


Fig. 11.

nachdem die Zunge ein wenig kleiner oder etwas länger als die Oeffnung ist. Im ersteren Fall kann also die Zunge eben frei ohne Berührung in der Oeffnung schwingen, im zweiten Fall nur nach einer Richtung frei schwingen. Der eintretende Luftstrom hebt das freie Ende der Zunge etwas ab, die dann infolge ihrer Elastizität wieder zurückschwingt und, durchschlagend oder aufschlagend die Rinne für einen Augenblick abschließt, die Luft strömt aus der Rinne hinaus. Dadurch läßt der Druck nach; beim Zurückschwingen der Zunge entsteht ein zweiter Luftstoß usw. Es treten also periodische Luftstöße in die Luft wie bei der Sirene, die den Ton erzeugen. Bei den Zungenpfeifen wird nun oben ein Ansatzrohr oder Pfeifenrohr aufgesetzt; die Luft in diesen hat ihre Eigenschwingung. Diese, sowie die Eigenschwingung der Zunge modifizieren sich gegenseitig, passen sich einander mehr oder weniger an. Ist die Zunge sehr hart, so dominiert ihr Eigenton, ist sie sehr weich, derjenige der Luftsäule; durch den Stimmdraht, der die Länge der schwingenden Zunge zu verändern erlaubt, kann man ihre Tonhöhe variieren (Fig. 12).

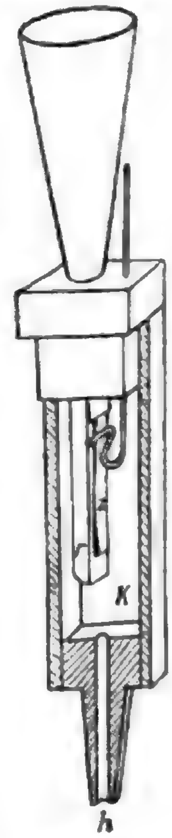


Fig. 12.

Von besonderem Interesse sind noch die ganz analog wirkenden membranösen Zungen, wie sie als tonbildendes Organ in der menschlichen Kehle enthalten sind als die beiden zu beiden Seiten der Stimmritze ausgespannten Stimmbänder. Es sind zwei schmale elastische Bänder, die einen schmalen zwischen ihnen liegenden Spalt, durch den von der Lunge her ein Luftstrom bläst, im Tempo ihres durch verschiedene Spannung variierbaren Eigentones öffnen und schließen und so den Luftstrom in einzelne in gleichen Intervallen folgende Luftstöße teilen.

6c) Elektrische Schallerregung. Entlädt sich eine elektrische Kapazität C, etwa eine geladene Leydener Flasche, durch eine Funkenstrecke, so entstehen, wenn in die Entladungsbahn noch eine Spule mit der Selbstinduktion L eingeschaltet ist, elektrische Schwingungen, deren Anzahl in der Sekunde gegeben ist durch $n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Da bei einer solchen Schwingung ein zweimaliger Funkenübergang und infolgedessen eine zweimalige momentane Erhitzung und damit Verdichtung der Luft eintritt, so sendet eine solche Funkenstrecke Schallwellen von der doppelten Schwingungszahl $N = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}$ aus. Durch Variation von L und C läßt sich die Schwingungszahl in weiten Grenzen variieren. Insbesondere kann man nach dieser Methode sehr bequem Schallwellen von viel größerer Schwingungszahl herstellen als früher auch nur annähernd

erreicht worden sind. Es ist so gelungen, Töne bis zur Schwingungszahl von etwa 300000 in der Sekunde zu erzeugen (Altberg). Noch über eine Oktave weiter, bis zu der enormen Zahl von 800000 v. d. pro sec. ist man (Dieckmann) mit einer analogen Anordnung am elektrischen Lichtbogen gekommen.

H. Th. Simon hat gezeigt, daß ein gewöhnlicher Lichtbogen, dem Wechselströme (etwa von einem Mikrophon, in welches hineingesprochen wird, herrührend) übergelagert werden, diese in Schallwellen umwandelt („sprechender Lichtbogen"). Die Ursache sind höchstwahrscheinlich die vom Wechselstrom in der Leitungsbahn erzeugten Temperaturschwankungen; diese bedingen entsprechende Schwankungen der Dichtigkeit der Lichtbogengase, die in der Luft fortgepflanzt werden und so Schallwellen hervorrufen (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung"). Elektrische Schwingungen hoher Frequenz und geringer Dämpfung dem Lichtbogen überlagern und damit wie im vorigen Fall Schallwellen von der Schwingungszahl $N = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ hervorbringen kann man in der folgenden Anordnung (Duddell, Poulson):

Man läßt den durch Gleichstrom gespeisten Lichtbogen, dessen Elektroden (Kupfer positiver, Kohle negativer Pol) ständig gekühlt werden, in einem Gase von gutem Wärmeleitvermögen (Wasserstoff, Leuchtgas) brennen und schaltet das elektrische Schwingungssystem ihm parallel (Dieckmann).

7. Bestimmung der Schwingungszahl. 7a) Mechanisch. Die absolute Bestimmung der Schwingungszahl ist eine außerordentlich schwierige Aufgabe, da es sich hierbei um eine sehr genaue Zeitmessung handelt. Wesentlich einfacher ist es, zwei Schallquellen in bezug auf ihre Schwingungszahlen miteinander zu vergleichen.

Von den verschiedenen benutzten Methoden seien folgende erwähnt:

Der Stimmgabelschreiber. An der tönenden festen Schallquelle (Stimmgabel, Klangstab, Metallzunge usw.) wird ein Schreibstift befestigt, dessen Masse im Verhältnis zu derjenigen der Schallquelle möglichst klein ist. Wird der tönende Körper über einer berußten Glasplatte hinweggezogen, so daß die Spitze des Schreibstiftes eben in den Ruß eingreift, so wird die Schwingungskurve in die Rußschicht eingegraben. Neben dieser Kurve läßt man von einem mit dem tönenden Körper fest verbundenen oder sonst auf ihm gleichschnell mitbewegten durch eine Zeitmeßvorrichtung, etwa ein Pendel, in bekannten Zeitintervallen in Bewegung gesetzten Schreibstift, eine Zeitmarkierung in den Ruß schreiben. Man braucht dann nur abzuzählen, wieviel Schwingungen des Körpers zwischen zwei Zeitmarken liegen. Es ist natürlich gleichgültig, ob man den tönenden Körper oder die Glasplatte bewegt. Melde hat diese Methode auch für sehr hohe Schwingungszahlen ausgearbeitet. Vielfach wird auch die Schwingung der Tonquelle anstatt auf eine ebene Platte auf eine rotierende berußte Trommel aufgezeichnet. Im Phonautograph wird der Schall zunächst (meist durch Schalltrichter konzentriert) auf eine Membran übertragen, die in Mitschwingen versetzt wird und nun erst die Schwingung durch ein an ihr befestigtes Schreibstiftchen, welches eine rotierende berußte Trommel berührt, aufzeichnet. Der Phonograph von Edison ist im Prinzip genau ebenso gebaut, nur wird an Stelle des leicht verwischbaren Rußes eine halbweiche aus Wachs und Stearin zusammengesetzte Masse genommen. Läßt man nun, nachdem der Schall seine Furche auf ihr eingegraben hat, den Schreibstift durch Drehen der Walze wieder auf dieser Furche entlang gleiten, so wird die Membran zwangsweise in dieselben Schwingungen versetzt, die sie bei der direkten Einwirkung des Schalles gemacht hatte, und damit die Luft in dieselben Schwingungen versetzt, so daß der Schall nun wiedergegeben wird.

Melde hat zur Bestimmung der Schwingungszahl fester tönender Körper, insbesondere der von ihm angegebenen Stimmplatten, folgende Resonanzmethode, die namentlich bei sehr hohen Schwingungen wertvoll ist, angegeben. Die Schwingung wird vermittels eines kleinen angeklebten Korkkeiles durch Berührung direkt auf das freie Ende eines am anderen Ende festgeklemmten Stabes übertragen. Man variiert dessen Länge, bis eine seiner Eigenschwingungen gleich der zu bestimmenden geworden ist und durch Resonanzwirkung stark auftritt, was man daran erkennt, daß sich aufgestreuter Sand an den Knotenlinien anhäuft. Ist der Stab bei irgendeiner Länge nach einem bekannten Ton geeicht, so kann man die Schwingungszahl für beliebige Stablänge und Ordnungszahl der Partialschwingung nach bekannten Formeln berechnen.

Phonisches Rad (La Cour, Rayleigh). Ein mit Zählwerk versehenes Rad, dessen Peripherie in gleichen Abständen mit Eisenstäbchen besetzt ist, rotiert vor einem Elektromagneten, dessen Stromkreis durch die Schwingungen des zu untersuchenden Körpers abwechselnd geschlossen und geöffnet wird. Eine beliebige Geschwindigkeit, die man der Trommel durch einen Anstoß erteilt hat, reguliert sich dann von selbst so, daß die Eisenstäbchen an dem Elektro-

magneten in dem Tempo zu der untersuchenden Schwingungszahl vorbeipassieren. Aus der Tourenzahl und der Anzahl der Stäbchen läßt sich die Schwingungszahl leicht berechnen.

7b) Optisch, Stroboskopisch (vgl. den Artikel „Stroboskopische Methoden“). Man betrachtet den schwingenden Körper durch die Löcher einer mit bekannter Geschwindigkeit rotierenden Lochscheibe oder bei einer in bekanntem Tempo intermittierenden Beleuchtung und reguliert die Geschwindigkeit der Scheiben bezw. der Intermittenzdauer der Belichtung so, daß man den betrachteten schwingenden Körper immer in derselben Phase sieht, er also scheinbar still steht. Befinden sich l Löcher auf der Scheibe und ist k die Umdrehungszahl, so ist kl die gesuchte Schwingungszahl. Ist die Regulierung noch nicht ganz vollkommen, so sieht man den schwingenden Körper ganz langsam seine Schwingung ausführen.

Eine oft angewandte Methode besteht darin, daß man an den tönenden Körper einen Spiegel befestigt. Ein an ihm reflektierter Lichtstrahl fällt auf eine mit konstanter Geschwindigkeit bewegte photographische Platte und zeichnet dort die Schwingungskurve auf. Aus dem Abstand gleicher Phasen und der Bewegungsgeschwindigkeit läßt sich die Schwingungszahl einfach berechnen. Auf gedeckte Pfeifen für sehr hohe Töne ist sie in der Weise angewendet worden, daß der feste Metalldeckel durch eine spiegelnde Glimmerplatte ersetzt wurde (Appunn, F. A. Schulze).

Lissajoussche Figuren. Eine sehr elegante und genaue optische Methode zur Vergleichung der Schwingungszahlen von zwei Stimmgabeln ist in der Beobachtung der nach ihrem Entdecker benannten Lissajousschen Figuren gegeben. Sie beruhen auf der Zusammensetzung von zwei rechtwinklig zueinander stattfindenden Schwingungen.

An den zwei miteinander zu vergleichenden Stimmgabeln werden kleine leichte Spiegel befestigt; die eine läßt man in horizontaler, die andere in vertikaler Ebene schwingen. Ein Lichtstrahl treffe so auf den ersten Spiegel, daß er nach dem zweiten Spiegel und von da auf einen Schirm reflektiert wird. Der Strahl zeichnet dann auf dem Schirm die Resultante der beiden Schwingungen auf. Haben beide Stimmgabeln genau gleiche Schwingungszahl, so ist die Kurve (bei genau sinusförmigen Schwingungen) eine Ellipse, deren Lage von der Phasendifferenz abhängt. Ist das Verhältnis der Schwingungszahlen 1 : 2, so hat die Kurve das Aussehen einer 8. Sind die Schwingungszahlen einander sehr nahe gleich, so führt die Ellipse (scheinbar) eine langsame Drehung aus, um nach einer gewissen Zeit wieder in die Anfangslage zu kommen. Dauert diese Drehung z. B. 100 Sekunden, so weiß man, daß die eine Stimmgabel in der Sekunde 0,01 Schwingungen mehr ausführt als die andere. Es ist dies wohl die genaueste Methode zur Vergleichung von zwei Stimmgabeln. Helmholtz hat nach diesem Prinzip die Schwingungsart von Saiten studiert, indem er einen Punkt der schwingenden Saite mit einem Mikroskop beobachtete, dessen Objektiv an der Zinke einer senkrecht zur Saitenschwingung schwingenden Stimmgabel befestigt war.

7c) Durch Schwebungen und Kombinationstöne. Auf rein akustischem Wege kann man die Schwingungszahlvergleichung zweier beliebiger Tonquellen durch Zählung der Schwebungen (s. Abschnitt 12) vornehmen, die sie miteinander in der Sekunde ergeben, falls sie nicht sehr weit voneinander liegen, oder, falls ihre Differenz so groß ist, daß die Zählung der Schwebungen nicht mehr möglich ist, durch Bestimmung der Schwingungszahl einer ihrer Kombinationstöne (s. Abschnitt 12). Die Schwebungen, deren Anzahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen ist, sind natürlich nur gut zu zählen, wenn ihre Anzahl etwa 5 pro Sekunde nicht übersteigt. Welcher von zwei festen tönenden Körpern die größere Schwingungszahl hat, erkennt man daran, daß die Zahl der Schwebungen kleiner wird, wenn man den Körper mit der höheren Schwingungszahl durch etwas Klebwachs oder dgl. belastet und dadurch seine Schwingungszahl verringert. Bei beliebig weit auseinanderliegenden Schwingungszahlen benutzt man, wie gesagt, die Kombinationstöne, deren Tonhöhe man auf irgendeine andere Weise bestimmt, wobei man aber sehr darauf zu achten hat, welcher der verschiedenen möglichen Kombinationstöne gerade vorliegt. Besonders gut eignet sich diese Methode zur Bestimmung der Schwingungszahlen sehr hoher Töne, etwa von Galtonpfeifen (C. Stumpf), da die Kombinationstöne hier in der Höhe der tieferen leicht in anderer Weise zu bestimmenden Töne liegen. Bei der Vergleichung von zwei Tönen, deren Intervall genau eine Quinte sein soll, wie zwei benachbarte Violinsaiten, macht sich eine Verstimmung durch die Schwebungen der beiden Differenztöne h—t und 2t—h bemerkbar.

Erwähnt sei schließlich noch eine Methode von Marbe, wonach eine Schallwelle auf eine rußende Flamme einwirkt. Auf einen durch die Flamme hindurchbewegten Papierstreifen schlägt sich bei jeder Schwingung ein Rußring nieder. Aus dem Abstand der Rußringe voneinander und der Geschwindig-

keit der Bewegung des Streifens ergibt sich die Schwingungszahl.

7d) Durch Messung der Wellenlänge. Ein sehr bequemes und oft angewandtes Verfahren zur Bestimmung der Schwingungszahlen, das auf alle Arten von Tönen anwendbar ist, besteht in der Messung der Wellenlänge des Tones, und zwar mit Benutzung stehender Wellen. Aus der Wellenlänge λ ergibt sich, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c bekannt ist, $n = \frac{c}{\lambda}$. Natürlich ist die Genauigkeit nie größer als diejenige, mit der c bekannt ist. Bei nicht sehr hohen Tönen kann man schon in freier Luft, allerdings wenig genau, die Knoten der durch Reflexion an der Zimmerwand entstehenden stehenden Welle mit dem Ohr bestimmen; das Maximum der Schallempfindung ist stets in einem Knoten, da das Ohr auf Druckschwankungen reagiert. Als objektiven Indikator kann man verschiedene Vorrichtungen benutzen, etwa eine mit Sand bestreute Membran oder dünne Platte, bei der an den Bäuchen der Sand aufwirbelt. Besonders ist diese Methode auch bei sehr hohen Tönen brauchbar (F. A. Schulze); bei der Kleinheit der Wellenlänge kann man hier den Ton an der Tischplatte reflektieren lassen und die Bäuche in der freien Luft zwischen Schallquelle und Tischplatte mittels einer auf einen Korkring geklebten mit Sand bestreuten Glimmerplatte erkennen. Auch die sensible Flamme (s. Abschnitt 6) kann bei hohen Tönen in analoger Weise als Indikator benutzt werden (Rayleigh). Ein ganz ausgezeichnetes und bequemes Mittel, die Knoten und Bäuche einer hinreichend intensiven stehenden Schallwelle in einem Rohre sichtbar zu machen, ist von Kundt in den nach ihm benannten Kundtschen Staubfiguren gegeben. Kundt fand, daß leichtes Pulver, Korkfeilicht, Lycopodiumsamen u. dgl. in einer stehenden nicht zu schwachen Schallwelle in Gasen und auch in Flüssigkeiten an den Bäuchen sich in feinen Querlinien, Rippen, in den Knoten in runden Häufchen sammelt. Sie beruhen, wie W. König gezeigt hat, auf hydrodynamischen Kräften der schwingenden Luft auf die feinen Partikel (über ihre Verwendung zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit s. Abschnitt 8).

Die Kundtschen Staubfiguren sind namentlich zur Bestimmung der Schwingungszahl sehr hoher Töne bei Stimmgabeln und Pfeifen benutzt worden (R. König, F. A. Schulze, Schwendt). Bei schwachen Tönen versagt diese Methode, man kann dann die Wellenlänge durch Interferenz bestimmen (über Interferenz s. Abschnitt 12) mit dem Quinckeschen Interferenzrohr oder der Quinckeschen Resonanzmethode. Bei dieser wird der Ton in das offene Ende einer Röhre geschickt, deren anderes Ende durch einen verschiebbaren Stempel geschlossen ist. Man sucht diejenigen Stellen des Stempels auf, bei welchen stärkste Resonanz eintritt, bei der also wie bei gedeckten Pfeifen die Länge der Röhre ein ungerades Vielfaches einer Viertel Wellenlänge ist, was man durch ein seitlich angesetztes zum Ohr führendes Ansatzröhrchen erkennt. Zwei benachbarte solche Stellen des Stempels liegen um die halbe Wellenlänge voneinander. Bei der zweiten Methode von Quincke bleibt der Stempel fest liegen und man horcht die Knotenstellen der stehenden Welle durch ein in die Röhre geführtes enges Hörrohr ab.

Erwähnt sei auch noch eine Modifikation, bei der man in einem Rohr Schallwellen dadurch erregt, daß man das eine Ende durch ein irgendwie, etwa durch einen Saitenunterbrecher, erregtes Telephon verschließt; das andere Ende ist durch einen verschiebbaren Stempel verschlossen, dessen Kopf ein Mikrophon trägt, das mit einem Hörtelephon verbunden ist.

Zwei benachbarte Stellungen des Stempels, bei denen ein Maximum der Tonintensität eintritt, liegen um eine halbe Wellenlänge des Tones auseinander. Man hat hierbei den Vorteil fast luftdichten Abschlusses.

Zur Bestimmung der Wellenlänge und damit der Schallgeschwindigkeit in oxydierbaren Gasen bei sehr hohen Temperaturen wurde in neueren Arbeiten (Wentz, Robitsch, Perron; für Kalium, Natrium und Cadmium) so verfahren, daß die vordere Verschlußmembran (aus Stahl) durch eine vorgesetzte Pfeife in Schwingungen versetzt wurde. Beim Verschieben des Stempels fand in Abständen von je einer halben Wellenlänge des Pfeifentones Resonanz der abgegrenzten Gassäule statt, was an einer eigentümlichen Modifikation der Klangfarbe des Tones erkennbar war.

Bei sehr hohen Tönen weit über der oberen Hörgrenze ist kürzlich (Stockmann) die Wellenlänge durch Interferenz mit der Boltzmannschen Zweispiegelmethode gemessen worden.

In den letzten Jahren ist zu diesen Methoden bei sehr hohen Tönen zur Bestimmung der Wellenlänge noch die Methode mittels Beugungsgitters hinzugekommen (Altberg, Dieckmann) in ganz analoger Weise wie in der Optik (vgl. den Artikel „Lichtbeugung"). Näheres hierüber wird im Abschnitt 8 mitgeteilt. Es gelang hierbei, Wellenlängen von nur 0,43 mm in Luft zu messen.

8. Schallausbreitung. 8a) Schallgeschwindigkeit. α) Theoretisches. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v von Longitudinalwellen in Gasen ergibt sich,

wie schon Newton berechnet hat (vgl. den Artikel „Wellenausbreitung") nach der allgemeinen Wellentheorie als die Wurzel aus dem Verhältnis einer kleinen Druckänderung zu der dadurch hervorgebrachten Aenderung der Dichte. Dieses Verhältnis ist nun verschieden, je nach der Geschwindigkeit, mit der die Dichtigkeitsänderung erfolgt. Geschieht diese so langsam, daß keine Temperaturänderung erfolgt, der Vorgang bei konstanter Temperatur, isotherm verläuft, so ist die Elastizität geringer als in dem anderen Extremfall, wenn die Druckschwankungen so schnell erfolgen, daß die erzeugten Temperaturänderungen sich wenig oder gar nicht ausgleichen. In ersterem Fall, bei isothermem Verlauf, für den das Gesetz von Boyle-Mariotte gilt, ist danach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwellen $\sqrt{\frac{\text{Druck}}{\text{Dichte}}}$. Erfolgt jedoch der Vorgang so schnell, daß die Temperatur sich nicht ausgleicht, adiabatisch, so ist die Schallgeschwindigkeit größer und zwar hat sie den Wert $v = \sqrt{k}\sqrt{\frac{\text{Druck}}{\text{Dichte}}}$, wobei $k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{\text{Spezifische Wärme bei konstantem Druck}}{\text{Spezifische Wärme bei konstantem Volumen}}$; k ist stets größer als 1.

Newton hatte bereits, isothermen Verlauf voraussetzend, die Formel $\sqrt{\frac{\text{Druck}}{\text{Dichte}}}$ angegeben. Es berechnet sich hiernach für Luft bei 0°: 280 m/sec, während die Formel $v = \sqrt{k}\sqrt{\frac{\text{Druck}}{\text{Dichte}}}$, die adiabatischen Verlauf voraussetzt, den tatsächlich beobachteten wesentlich höheren Wert 332 m/sec ergibt. Man verdankt Laplace die Verbesserung der Newtonschen Formel.

Da die Dichte der Gase mit steigender Temperatur abnimmt, so wächst die Schallgeschwindigkeit mit der Temperatur, und zwar für alle Gase, soweit sie den idealen Gasgesetzen folgen, nach der Formel

$$v_t = v_0 (\sqrt{1 + 0{,}00367 . t}),$$

wo v_0 bezw. v_t die Schallgeschwindigkeit bei 0° bezw. t° sind. Die Erfahrung bestätigt durchaus diese Folgerung. Diese Aenderung mit der Temperatur ist so stark, daß Quincke hierauf eine Methode zur Messung hoher Temperaturen gegründet hat.

Dagegen ist, solange die Gase als ideal betrachtet werden können, die Schallgeschwindigkeit ganz unabhängig vom Druck, was ebenfalls durch die Erfahrung vollständig bestätigt wird. Ferner ist die Schallgeschwindigkeit, solange man nur kleine relative Dichtigkeitsänderungen voraussetzt, ganz unabhängig von der Intensität und von der Schwingungszahl, die beide in der Formel nicht vorkommen.

β) Schallgeschwindigkeit in Gasen. Direkte Messungen der Schallgeschwindigkeit, d. h. Messungen der Zeit, die ein Schall braucht, um von der Ausgangsstelle eine bestimmte Weglänge zurückzulegen, liegen nur für Luft vor, wo sie sehr häufig angestellt worden sind. Es wurden dabei Strecken bis zu 18 km benutzt. Zur Elimination des Windes, der den Schall mit sich fortführt, wurde von der Empfangsstation ebenfalls gleichzeitig ein Schall nach der Ausgangsstation gesandt. Der Mittelwert der so erhaltenen Werte beträgt rund 332 m/sec bei 0° C.

Schallgeschwindigkeit in Röhren. Eine sehr viel benutzte und sehr bequeme Methode zur Messung der Schallgeschwindigkeit besteht in der Messung der Wellenlänge λ in Verbindung mit der Schwingungszahl n. Die Schallgeschwindigkeit v ergibt sich dann aus der allgemeinen Beziehung $v = n\lambda$. Meist ist hierbei die bequeme Methode der Kundtschen Staubfiguren (s. 7d) benutzt worden.

Hierbei ist aber zu beachten, daß die Schallgeschwindigkeit in Röhren kleiner ist als im freien Raum, wie bereits von Kundt gefunden worden ist. Diese Verminderung der Schallgeschwindigkeit in Röhren hat ihre Ursache in der inneren Reibung des Gases, sowie darin, daß infolge Abgabe der Wärme an die Röhrenwand der Schallvorgang nicht mehr ideal adiabatisch, ohne Wärmeabgabe, verläuft. Die Verminderung ist um so größer, je enger das Rohr und je tiefer der Ton ist; sie kann Beträge bis zu einigen Prozent erreichen. Alle in Röhren erhaltenen Resultate sind also zu klein, und durch Anwendung einer von Kirchhoff angegebenen Formel auf den freien Raum umzurechnen.

Die Werte der Schallgeschwindigkeit bei 0° für einige Gase sind folgende:

Gas	m/sec
Luft	332
Kohlensäure	621
Leuchtgas	490
Wasserstoff	1260
Sauerstoff	317
Stickstoff	337

Die Unabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Druck gilt für Gase nur, soweit sie annähernd die idealen Gasgesetze befolgen. Je weniger diese Gesetze erfüllt sind,

also bei hohen Drucken und tiefen Temperaturen, um so mehr sind Abhängigkeiten vom Druck vorhanden, die in extremen Fällen sogar sehr groß werden können. Nach Versuchen von P. P. Koch wächst z. B. die Schallgeschwindigkeit in Luft bei 0^0 mit steigendem Druck und erreicht bei ca. 187 Atmosphären Druck einen um etwa 20% größeren Wert, ca. 401 m/sec.

Bei der Temperatur der festen Kohlensäure, -79^0, ist diese Abhängigkeit vom Druck noch erheblich größer. Die Schallgeschwindigkeit nimmt hier von dem für 1 Atmosphäre gültigen Wert (ca. 279 m/sec) bei steigendem Druck zunächst etwas ab, steigt dann schnell an und steigt bei 195 Atmosphären auf ca. 404 m/sec, also fast das $1\frac{1}{2}$fache an.

Nach der Formel $v = \sqrt{k \frac{\text{Druck}}{\text{Dichte}}}$ ist (für genügend kleine Intensität) die Schallgeschwindigkeit in Gasen auch von der Schwingungszahl unabhängig, was von der Erfahrung vollständig bestätigt wird. Nach den Versuchen von Dieckmann hat die Schallgeschwindigkeit in Leuchtgas bis zu der enormen Schwingungszahl von 800000 v. d. einen bestimmten von der Schwingungszahl unabhängigen Wert, 455 m/sec.

Dagegen ist, wie schon erwähnt, die Schallgeschwindigkeit in Röhren um so kleiner, je kleiner die Schwingungszahl ist (und je enger die Röhre ist). Bei tiefen Tönen und engen Röhren sind in Luft Schallgeschwindigkeiten von 317 m/sec und weniger (bei 0^0) gefunden worden. Für die Töne des in der Musik verwendeten Tonbereiches folgt übrigens die Unabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Schwingungszahl schon aus der Tatsache, daß man ein Musikstück in beliebig weiten Entfernungen in gleichem Takt und gleicher Harmonie hört.

Nach der Formel ist die Schallgeschwindigkeit auch von der Intensität unabhängig. Zur Prüfung dieser Folgerung von Kayser unternommene Versuche, bei welchen die Intensitäten im Verhältnis 1 : 70 variiert wurden, ergaben in der Tat völlige Unabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Intensität. Es ist aber schon darauf hingewiesen, daß die Ableitung der Formel nur für kleine Geschwindigkeiten und kleine relative Dichtigkeitsänderungen gilt. Bei großen Amplituden ergibt die Theorie (Riemann) eine Abhängigkeit von der Amplitude in dem Sinne, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit zunehmender Amplitude wächst. Bei der Messung der Geschwindigkeit von Explosionswellen, die in der Nähe des Erregungszentrums sehr groß ist (bis ca. 1000 m in Luft), hat sich gute Uebereinstimmung mit der Riemannschen Theorie ergeben (Wolff). Aehnliche anormale Verhältnisse treten auch beim scharfen Schuß ein. Der Schall wird vom Geschoß mitgeführt, solange dessen Geschwindigkeit die normale Schallgeschwindigkeit übersteigt; sobald sich jedoch die Geschwindigkeit des Geschosses auf diese vermindert hat, löst sich der Schall vom Geschoß ab und geht selbständig weiter, also dem Geschoß voran.

γ) Schallgeschwindigkeiten in Flüssigkeiten. Es gilt hier die Formel

$$v = \sqrt{\frac{\text{Widerstand gegen Volumenänderung}}{\text{Dichte.}}}$$

Der Widerstand gegen Volumenänderung ist hier gegeben durch den reziproken Wert der Kompressibilität, so daß

$$v = \sqrt{\frac{1}{\text{Kompressibilität mal Dichte.}}}$$

Die beobachteten Werte stimmen sehr gut mit den nach dieser Formel berechneten überein. Direkte Messungen durch Signalmethoden sind nur für Wasser über die Breite des Genfer Sees ($13\frac{1}{2}$ km) angestellt; sie ergaben 1435 m/sec bei 8^0, während sich aus Dichte und Kompressibilität 1447 m/sec berechnet. Die meisten Bestimmungen sind in Röhren mit Benutzung der Kundtschen Staubfiguren gemacht, die sich auch in Flüssigkeiten ausbilden (Kundt und Lehmann, Dörsing). Anstatt Kork wird hier gut getrockneter feingemahlener Bimssteinsand genommen. Die Röhrenwand bedingt auch hier eine Korrektion, die aber nicht oder nur zum geringsten Teil in dem Einfluß von Reibung und Wärmeleitung, sondern auf der elastischen Nachgiebigkeit der Röhrenwand beruht. Als Kompressibilität ist in der Formel die adiabatische für schnelle Druckänderungen geltende Kompressibilität zu setzen. Sie ist k-mal kleiner als die experimentell bestimmte isotherme für langsame Druckänderung gültige Kompressibilität (k = Verhältnis der spezifischen Wärmen).

δ) Schallgeschwindigkeit in festen Körpern. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen in festen Stäben ist gegeben durch $v = \sqrt{\frac{\text{Elastizitätsmodul}}{\text{Dichte.}}}$

Die meisten Bestimmungen sind wieder mit Kundtschen Staubfiguren gemacht worden. Das ebenso elegante wie genaue von Kundt angegebene Verfahren ist folgendes: Ein beiderseits freier in der Mitte festgeklemmter Stab wird durch Anreiben in seine Longitudinalgrundschwingung versetzt, die mit Hilfe einer an seinem Ende befestigten Korkplatte oder dgl. in ein am anderen Ende geschlossenes Glasrohr geschickt wird, in dem eine stehende Welle

entsteht, deren Knoten und Bäuche durch die Kundtschen Staubfiguren sichtbar gemacht werden. Die halbe Wellenlänge desselben Tones von der Schwingungszahl n ist also in Luft durch den Abstand l' zweier benachbarter Knotenstellen der Kundtschen Staubfiguren, im Stab als Länge l des Stabes gegeben. Ist v die Schallgeschwindigkeit im Stabe, v' diejenige in der Luft, so ist $n = \frac{v'}{2l'} = \frac{v}{2l}$, woraus $v = v' \frac{l}{l'}$.

Die Schallgeschwindigkeit ist in festen Körpern meist größer als in Gasen, mehrere Kilometer in der Sekunde; in der folgenden Tabelle sind einige Werte angegeben.

Stoff	V in $\frac{m}{sec}$
Aluminium	5100
Eisen	5000
Messing	3400
Glas	5000
Blei	1300

In Holz ist v längs der Faser bedeutend größer als quer zur Faser, z. B. bei Tannenholz im Verhältnis 2, 2 : 1. Mit steigender Temperatur nimmt die Schallgeschwindigkeit im allgemeinen langsam ab. Sehr schnell ist jedoch die Abnahme bei weichen, dem Schmelzpunkt nahen Substanzen; z. B. nimmt die Schallgeschwindigkeit in Paraffin von 1522 m/sec bei 6°,1 auf 250 m/sec bei 35°,3 ab.

8b) Reflexion. Schallwellen zeigen in gleicher Weise Reflexion wie die Lichtwellen. Im allgemeinen wird die Analogie mit den Lichtwellen nur dadurch gestört, daß meist die Dimension der Wellenlänge der hörbaren, insbesondere der tiefen Töne, groß oder wenigstens vergleichbar ist mit den Dimensionen der im Laboratorium gewöhnlich verwandten Schirme, Oeffnungen usw., so daß dann erhebliche Störungen der regelmäßigen Reflexion durch Beugung entstehen.

Es gibt bei den tieferen Tönen keinen so scharf abgrenzbaren Strahl wie beim Licht; der Schall „geht um die Ecke". Die ungeheueren Abweichungen von der geradlinigen Ausbreitung, die bei den tiefen Tönen eintreten, bedingen es, daß auch die Reflexion nicht so deutlich und scharf auftritt wie beim Licht. Es gilt das Reflexionsgesetz, daß der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist, immerhin insofern, als im reflektierten Schall im Reflexionswinkel ein Maximum der Intensität vorhanden ist. Je höher der Ton, also je kürzer die Wellenlänge, desto mehr geht die Reflexion ganz nach den Gesetzen der Lichtreflexion ohne Störung durch Beugung vor sich. Das Ticken einer im Brennpunkt eines Rotationsparaboloids befindlichen Uhr wird zu einem parallel hinausgehenden Strahlenbündel reflektiert, außerhalb dessen es nicht oder nur schwach gehört wird.

Zu den bekanntesten durch die Reflexion an Wänden verursachten Erscheinungen gehören Nachhall und Echo. Sie unterscheiden sich nur dadurch, daß beim Nachhall der direkte und der reflektierte Schall sehr kurze Zeit aufeinanderfolgen, und sich auch überdecken, was bei lang andauerndem Schall und kleinem Abstand der reflektierenden Wand eintritt, während beim Echo eine Pause zwischen dem direkt und dem durch Reflexion gehörten Schall liegt. Bekannte Anwendungen der Schallreflexion sind Hörrohr und Sprachrohr. Beim ersten, analog auch beim Stethoskop, wird eine Schallmenge, die sonst unbenutzt neben dem Ohr vorbeiginge, durch mehrfache Reflexionen an der Wand des Hörrohres zum Ohr hingeleitet, beim Sprachrohr der Schall möglichst parallel gemacht und damit ein möglichst großer Teil der Schallenergie, der sonst zerstreut würde, zusammengehalten und nach einer bestimmten Richtung hingeleitet. Die Gesetze der Schallreflexion sind von besonderer Wichtigkeit für die Akustik in Sälen. Reflexion findet nicht nur an festen Wänden statt, sondern auch z. B. an der Grenze von zwei Luftschichten verschiedener Temperatur, Feuchtigkeit usw. Tyndall führt auf das Vorhandensein solcher „akustischer Wolken" die außerordentliche Verschiedenheit der Hörweite von Schüssen, Signalen usw. zu verschiedenen Zeiten zurück.

8c) Brechung. Es gilt wie in der Optik das Brechungsgesetz, daß sich der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels wie die Schallgeschwindigkeit im ersten Medium zu derjenigen im zweiten verhält. Es lassen sich z. B. akustische Linsen experimentell herstellen; Sondhauß konstruierte linsenförmige Kohlensäurebehälter aus Kollodiumhäuten. Das Ticken einer 4 bis 5 Fuß entfernten Uhr wurde auf der anderen Seite in $1^1/_4$ Fuß Entfernung, wo sich das akustische Bild der Schallquelle befand, am deutlichsten gehört. Allerdings spielt hier auch die Beugung des Schalles eine Rolle. Wie bei Lichtstrahlen tritt auch bei Schallstrahlen beim Uebergang des Schalles aus dem „akustisch dichteren" in das „akustisch dünnere" Medium von einem bestimmten Grenzwinkel an Totalreflexion ein. Dieser Grenzwinkel ist für einen aus Luft auf eine Wasserfläche auftreffenden Schallstrahl, wo das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit etwa 1 : 4 beträgt, nur 13°. Alle schiefer auftreffenden Schallstrahlen werden total in die Luft reflektiert.

Wie Lichtstrahlen, die schief durch ein Medium gehen, dessen Brechungsexponent

sich von Ort zu Ort stetig ändert, in ihrem Verlauf allmählich gekrümmt werden, so auch Schallstrahlen. Es kann dabei zu einer vollständigen Umkehr kommen. Im großen Maßstab kommt diese Erscheinung in der Atmosphäre vor, wo mit steigender Höhe sich Temperatur und Zusammensetzung der Schichten stetig ändert. Bei sehr starken Explosionen, Geschützdonner usw. wird nämlich das Gebiet um die Schallquelle herum, wo der Schall direkt noch gehört wird, durch ein Gebiet von vielen Kilometern Ausdehnung, der sogenannten „Zone des Schweigens" von einem zweiten Gebiet getrennt, in dem der Schall wieder gehört wird. Die Schallgeschwindigkeit wächst mit der Höhe, da allmählich immer leichtere Gase vorwiegen und schließlich bei ca. 70 Kilometer Höhe nur noch Wasserstoff (und, nach A. Wegener, Geokoronium) vorhanden ist. Dies bewirkt, daß die schief nach oben gehenden Schallstrahlen allmählich herumgebogen werden und in einer gewissen Entfernung wieder auf die Erde gelangen. Die berechnete Größe der „Zone des Schweigens" stimmt gut mit den Beobachtungen (v. d. Borne).

8d) Beugung. Bei den Tönen des musikalischen Bereiches findet infolge der großen Wellenlänge ganz außerordentlich große Beugung, Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung in den „Schallschatten" hinein statt, so daß namentlich tiefere Töne dicht hinter Hindernissen, Pfeilern u. dgl. gut zu hören sind. Je kleiner jedoch die Wellenlänge des Tones ist, um so mehr nähern sich die Verhältnisse denjenigen, die wir von den Lichtstrahlen her gewohnt sind, also der geradlinigen Ausbreitung, der geometrischen Optik. Bei sehr hohen Tönen, wie sie von den Funken elektrischer Schwingungskreise ausgehen, lassen sich in der Tat die aus der Optik bekannten Versuche über Lichtbeugung (vgl. den Artikel „Lichtbeugung") mit Apparaten von verhältnismäßig sehr kleinen Dimensionen bequem ausführen. Insbesondere sind hier die Versuche von Altberg und Dieckmann mit Durchlässigkeits- und Reflexionsgittern zu nennen. Bei den Versuchen von Dieckmann hatten die Gitter eine Fläche von nur 10 × 10 cm. Die Gitterkonstanten betrugen 4,9 bezw. 2,5 mm. Es bildeten sich bei den sehr kleinen Wellenlängen (0,5 bis 5,6 mm) wie bei optischen Beugungsgittern die seitlich der Mitte gelegenen Beugungsmaxima erster Ordnung mit größter Schärfe aus.

Es besteht überhaupt in bezug auf Beugung beim Schall das umgekehrte Verhalten wie beim Licht. Im Bereich der leicht beobachtbaren und herstellbaren hörbaren Töne, wo die Wellenlänge von der Größenordnung der Laboratoriumsdimensionen ist, tritt die Beugung meist so stark auf, daß von Schattenbildung wenig zu merken ist. Eine solche muß erst durch besondere Anordnung hervorgebracht werden. Beim Licht hingegen, wo die Wellenlänge immer klein ist gegen die Laboratoriumsdimensionen, tritt die Beugung fast ganz zurück, und die Erzeugung meßbarer Beugungserscheinungen erfordert besondere Apparate.

8e) Absorption. Von der selbstverständlichen Schwächung des Schalles bei der Ausbreitung auf größere Flächen ist wohl zu unterscheiden die durch Absorption, innere Reibung, Umwandlung in andere Energieformen, insbesondere Wärme, erfolgende Schwächung der Schallintensität. Wasser leitet den Schall besonders gut. Die Metalle schwächen in sehr verschiedenem Maß, Platin etwa dreimal weniger als Blei. In Gasen wird die Schallbewegung durch Reibung und Wärmeleitung absorbiert (Helmholtz, Stokes, Kirchhoff, Rayleigh) und zwar wird die Schallintensität einer ebenen Welle von der Wellenlänge λ nach Durchlaufen einer Strecke x vom Anfangswert J_0 geschwächt auf den Wert $J = J_0 e^{-A\frac{x}{\lambda^2}}$, wo A eine die innere Reibung, die Wärmeleitung, Dichte, spezifische Wärme und Schallgeschwindigkeit enthaltende Größe ist, die für Luft den Wert 0,00032 im C.G.S.-System hat. Die Strecken, auf welchen die Intensität auf den hundertsten Teil des Anfangswertes sinkt, sind demnach für

$\lambda = 0{,}8$ mm	l = 40 cm
0,4 „	10 „
0,2 „	2,5 „
0,1 „	0,6 „

wodurch also eine Grenze für die kürzesten, noch beobachtbaren akustischen Wellen gegeben ist (Lebedew). Versuche an Funkenschallwellen bis zu $\lambda = 0{,}83$ mm herunter haben für A den der Größenordnung nach stimmenden Wert 0,00073 ergeben (Neklepajev).

Sehr kompliziert liegen die Verhältnisse bei dem praktischen Problem der Isolationsmittel gegen Schall. Will man in einem Raum, in dem der Schall selbst entsteht, Schutz gegen Nachhall haben, so muß man ihn mit schweren Teppichen u. dgl. auskleiden, die den Schall stark absorbieren und wenig reflektieren. Soll dagegen der Raum gegen von außen kommenden Schall gut isolieren, so muß man möglichst massive schwere dicke Metallwände anwenden und durch starke Befestigung und andere Mittel dafür sorgen, daß der Schall nicht durch Transversalschwingungen der Wände als Ganzes in den Raum übertragen wird. Ganz anders ist es bei Isolierung gegen Bodenschall, d. h. solchen Schall, der nicht durch

die Luft, sondern durch feste Körper geleitet wird, wie etwa beim Begehen des Fußbodens, Einschlagen eines Nagels usw. Hier sind gerade die massiven festen Wände vorzügliche Schallleiter, während Korkstein, Filz und ähnliche derartige Substanzen, die den Luftschall, der von außen kommt, nicht so sehr schwächen, den Bodenschall gut abfangen (Weisbach, Berger).

9. Schallintensität. Als Schallintensität wird definiert die in einer Sekunde durch ein Quadratzentimeter gehende Energiemenge, oder auch die in einem Kubikzentimeter enthaltene Energiemenge, die mittlere räumliche Energiedichte. Zur Messung der Schallintensität sind in den letzten Jahren mehrere sehr brauchbare Methoden ausgearbeitet worden. Die Energie ist proportional dem Quadrat der Amplitude der Schallbewegung sowie auch dem Quadrat der maximalen Dichtigkeitsänderung. Diese ist auf optische Weise von Toepler und Boltzmann gemessen. Sie brachten zwei Lichtstrahlen zur Interferenz, von denen der eine durch die tönende, der andere durch ruhende Luft ging. Die schwingenden Interferenzstreifen wurden auf einer rotierenden Trommel photographiert (Raps). Aus der Verschiebung der Interferenzstreifen ergibt sich die maximale Aenderung des Brechungsexponenten n und damit der Dichte.

Auch mit dem Vibrationsmanometer von M. Wien wird die maximale Druckschwankung gemessen. Die sonst ins Ohr gesteckte Oeffnung eines Kugelresonators, der auf den zu untersuchenden Ton abgestimmt ist, ist von einer Membran verschlossen. An dieser ist ein Spiegel befestigt, der eine an ihm reflektierte Lichtlinie in ein Lichtband auszieht, wenn der Resonator von dem Ton getroffen wird. Die Breite des Lichtbandes ist proportional der maximalen Druckschwankung.

Ein anderes Prinzip benutzt die von Rayleigh berechnete Druckwirkung, die eine Schallwelle auf eine Wand ausübt. Ist E die mittlere räumliche Schallenergiedichte, k das Verhältnis der spezifischen Wärmen des Gases, so ist der Druck auf das Quadratzentimeter $p = E\frac{k+1}{2}$. Die Wand ist eine bewegliche Scheibe, die an einer Drehwage hängt, mit der man die Druckwirkung mißt (Altberg). Zernov mißt die Druckkraft mit der Wage.

Endlich wird zur Intensitätsmessung das Drehungsmoment benutzt, welches nach der Beobachtung von Rayleigh eine in den Schallstrahlengang drehbar gehängte Scheibe erfährt, und welches die Scheibe senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Schallwellen zu drehen strebt. Das Scheibchen wird an einem Torsionsfaden aufgehängt. Die Drehungsmomente sind von Zernov in Uebereinstimmung mit der von W. König gegebenen Theorie gefunden worden. Es genügt ein 3 mm großer Galvanometerspiegel, der an einem Quarzfaden hängt, so daß der Apparat bei großer Empfindlichkeit und bequemer Handhabung sehr kompendiös ist. Es scheint hiermit endlich eine bequeme Methode zur Messung der Schallintensität gegeben zu sein, an der es bisher fehlte.

Erwähnt seien an dieser Stelle auch die Anziehungen und Abstoßungen, die Luftresonatoren in der Nähe einer Schallquelle erfahren, und die besonders von Dvořak und Lebedew untersucht worden sind, wobei es sich, abgesehen von direkten Wirkungen auf den Resonatorkörper und Reaktionskräften, um Wechselwirkung der erregenden und der im Resonator erzwungenen Schwingung handelt. Es ergaben sich für den Fall, daß sich der Resonator sehr nahe der Schallquelle befindet, folgende Gesetzmäßigkeiten: Je nachdem der Resonator höher oder tiefer gestimmt ist als die Schallquelle, wird er von ihr angezogen oder abgestoßen, und zwar um so stärker, je näher die Schwingungen übereinstimmen.

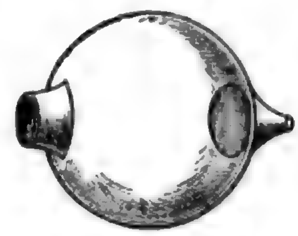
10. Dopplereffekt. Bewegt sich das Ohr gegen eine Schallquelle hin oder umgekehrt diese auf das Ohr zu, so erhöht sich die Tonhöhe gegen ihren Normalwert, weil das Ohr in der Sekunde von mehr Verdichtungen getroffen wird als bei gleich bleibender Entfernung von Schallquelle und Ohr. Bei Vergrößerung des Abstandes von Ohr und Schallquelle vertieft sich der Ton entsprechend. Ist n die normale Schwingungszahl, c die Schallgeschwindigkeit in Luft, v die Geschwindigkeit des Hörers, u diejenige der Schallquelle, beide bei Verringerung des Abstandes positiv gezählt, so ist die gehörte Schwingungszahl $N = \frac{c+u}{c-v}n$. Die Formel hat sich durch die Beobachtungen gut bestätigt gefunden. Für den Fall, daß die Geschwindigkeit der Schallquelle größer ist als die Schallgeschwindigkeit, verliert die Formel ihre Gültigkeit, weil Körper, die sich mit Ueberschallgeschwindigkeit bewegen, den Schall mit sich führen. Die Erscheinung des Dopplereffekts ist an schnell vorbeifahrenden pfeifenden Lokomotiven, dem Glockensignal von Radfahrern usw. gut zu beobachten.

11. Superposition und Analyse von Schwingungen. 11a) Ungestörte Superposition kleiner Bewegungen. Wie angegeben ist jede Tonquelle verschiedener Schwingungen fähig, des Grundtones und der Obertöne, und diese Schwingungen können gleichzeitig in der Schallquelle vorhanden sein und sich über-

lagern. Die tatsächliche Bewegung der Schallquelle und damit auch die Schwingungsbewegung der Luft ist nun, solange die Schwingungen klein sind, nach dem Prinzip der ungestörten Superposition kleiner Bewegungen einfach durch die algebraische Summe der von den Einzelschwingungen erzeugten Elongationen gegeben.

Sind außer dem Grundton nur zum Grundton harmonische Obertöne vorhanden, so ist die Schwingungskurve natürlich periodisch nach der Zeit mit der Schwingungsdauer des Grundtones als Periode. Es gilt nun auch umgekehrt der als Fouriersches Theorem (s. den Artikel „Fouriersches Theorem") bezeichnete Satz, daß jede periodische Wellenform sich als einfache Uebereinanderlagerung von einfachen pendelförmigen, sinusförmigen Schwingungen darstellen läßt, deren Schwingungszahlen im Verhältnis ganzer Zahlen zueinander stehen, und deren längste Periode gleich der gegebenen Periode ist, und zwar auf eine einzige Weise.

11b) Resonanz. Resonatoren. Die Aufgabe, die von irgendeiner Tonquelle ausgehenden in ihr enthaltenen Teiltöne nach Schwingungszahl und Intensität zu ermitteln, wird gelöst vermittels der von Helmholtz angegebenen Resonatoren. Sie beruhen auf dem Prinzip der Resonanz. Läßt man eine sinusförmige Schallwelle auf einen zunächst ruhenden schwingungsfähigen Körper auffallen, etwa die von einer schwingenden Stimmgabel ausgehende Schallwelle auf eine zweite Stimmgabel, so wird diese allmählich ebenfalls zu starkem Schwingen gebracht, wenn ihre Eigenschwingungszahl mit der Schwingungszahl der ersten Stimmgabel übereinstimmt. Es wird nämlich der kleine Anstoß, den die zweite Gabel durch die erste ankommende Welle erhält, sie ganz wenig aus der Gleichgewichtslage entfernen, in die sie dann vermöge ihrer Eigenelastizität wieder zurückschwingt und über die sie vermöge der Trägheit nach der anderen Seite hinüberschwingt; durch die hierdurch geweckte elastische Kraft kehrt sie wieder in die Gleichgewichtslage zurück, die sie mit einer gewissen Geschwindigkeit passiert. Die bis hierher verstrichene Zeit ist die Periode ihrer Eigenschwingung. Hat nun die anregende Stimmgabel genau dieselbe Schwingungsdauer, so erfährt die zweite Stimmgabel in diesem Augenblick wieder einen Anstoß in der ersten Richtung, der also die kleine vom ersten Anstoß eingeleitete Schwingung verstärkt, und so wirkt jeder von der ersten Gabel kommende Anstoß verstärkend auf die Schwingung der zweiten Gabel; diese kommt allmählich in starkes Schwingen. Hat dagegen die zweite Stimmgabel eine andere Eigenschwingungszahl als die erste, z. B. nur die Hälfte, so würde der zweite von der ersten Gabel kommende Anstoß die zweite Gabel gerade mitten in der Rückschwingung fassen, also ihre Bewegung hemmen, es kann nicht zu einer kräftigen Anregung kommen. Die zweite Stimmgabel spricht also wesentlich nur auf Schwingungen an, deren Zahl gleich der Zahl ihrer Eigenschwingungen ist. Man nennt diese Anregung der Schwingung: Mitschwingen durch Resonanz. Man kann so also untersuchen, ob in einer ankommenden Schallwelle ein Teilton enthalten ist, dessen Schwingungszahl gleich der Schwingungszahl der als Resonator dienenden Stimmgabel ist, die Stimmgabel dient als Resonator. Besonders geeignet als Resonatoren sind Luftsäulen. Helmholtz benutzte als Resonatoren teils einseitig geschlossene zylindrische Röhren aus Messing oder Glas, Zylinderresonatoren, teils kugelförmige Resonatoren mit Oeffnungen bei a und b, Fig. 13.


a

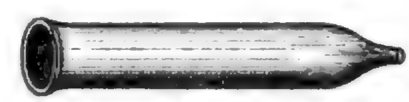

b

Fig. 13.

Sie werden entweder objektiv benutzt, wobei die Oeffnung b verschlossen wird, oder zur subjektiven Beobachtung, indem der kleine zylindrische offene Ansatz b ins Ohr gesteckt wird, wobei dann das Trommelfell die Rolle des Verschlusses spielt. Mit diesen Resonatoren hat Helmholtz eingehend die Teiltöne einer große Zahl von Schallquellen, namentlich der Musikinstrumente und der menschlichen Stimme untersucht. Er wies so nach, daß die Klangfarbe auf der Zahl und Intensität der im Klang enthaltenen Partialtöne beruht. Fehlen der Obertöne gibt einen milden, weichen Klang, während das Vorhandensein mehrerer Obertöne in nicht zu starker Intensität den Klang voll und wohllautend macht. Sind die höheren Obertöne sehr stark vertreten, so bekommt der Klang etwas Schmetterndes, Klirrendes. Näheres siehe in dem Artikel „Klang".

11c) Ohmsches Grundgesetz der Tonempfindung. Es ist eine seit den Forschungen von Helmholtz feststehende Tatsache, daß das Ohr die Fähigkeit hat,

die in einem beliebigen Klang enthaltenen Teiltöne bei einiger Aufmerksamkeit und Uebung auch ohne Hilfe von Resonatoren, alle einzeln herauszuhören; es führt also die Fouriersche Analyse aus. Es entspricht dies dem von G. S. Ohm aufgestellten Grundsatz der Gehörempfindung. Danach nimmt das Ohr nur eine sinusförmige Luftbewegung als einen einzelnen, reinen Ton wahr. Dieser Lehre haben Seebeck, Joung, R. Koenig die andere prinzipiell von ihr verschiedene entgegengestellt, wonach das Ohr jede beliebige Art von Periodik, auch nicht genau sinusförmiger Form, als einfachen Ton empfinde. Der Streit zwischen diesen beiden Hypothesen spielt noch bis in unsere Tage, scheint sich aber durchaus zugunsten der Ohmschen Lehre zu entscheiden, indem diese eine Menge Erscheinungen zu erklären vermag, von denen die Seebecksche Annahme keine Rechenschaft zu geben imstande ist, und indem sie auch physiologisch durch die von Helmholtz aufgestellte Resonanztheorie des Hörens verständlich gemacht worden ist (vgl. den Artikel „Gehörsinn").

12. Zusammenklang der Töne. **12a)** Interferenz. Wird die Luft gleichzeitig von zwei Wellenzügen ergriffen, so gilt für die tatsächliche Bewegung der Luft das Prinzip der ungestörten Superposition kleiner Bewegungen. In dem Spezialfall, daß beide Wellenzüge von Tönen gleicher Intensität und Schwingungszahl stammen, können sich also beide Bewegungen vollständig vernichten, wenn sie so zusammentreffen, daß die von dem einen Ton erzeugte Bewegung immer gerade entgegengesetzt gleich der vom anderen erregten ist, also Verdichtung stets mit Verdünnung und umgekehrt zusammentrifft, interferiert. Trifft aber Verdichtung mit Verdichtung, Verdünnung mit Verdünnung zusammen, so addieren sich die Amplituden zur doppelten Größe.

Eine Anwendung hiervon ist bereits bei der Erklärung der Bildung stehender Wellen durch Interferenz einer hingehenden Welle mit der reflektierten gegeben. Man kann die Erscheinung der Interferenz sehr gut beobachten mit dem von Quincke angegebenen Interferenzapparat (Fig. 14), bei dem ein in eine Röhre bei A eintretender Ton sich in zwei getrennte Wege über CHF und über BGE verzweigt; bei D werden die beiden getrennten Wellenzüge wieder zusammengefaßt und zum Ohr geleitet. Je nachdem nun der Weg über BGE, dessen Länge nach Art eines Posaunenauszuges verändert werden kann, um ein gerades oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge von der Länge des Weges über CHF verschieden ist, erhält man bei D Verstärkung oder Auslöschung des Tones durch Interferenz. Von Interesse sind auch die räumlichen Interferenzen, die von den beiden Einzelwellen herrühren, welche die beiden Zinken einer tönenden Stimmgabel aussenden (Fig. 15).

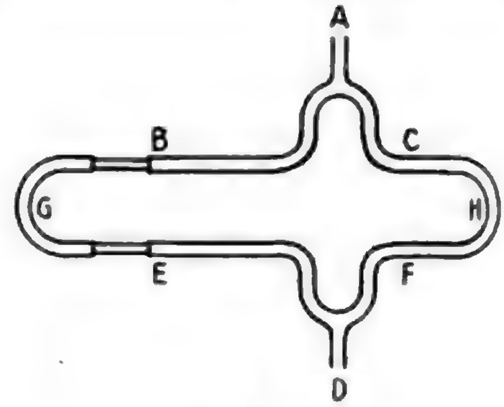


Fig. 14.

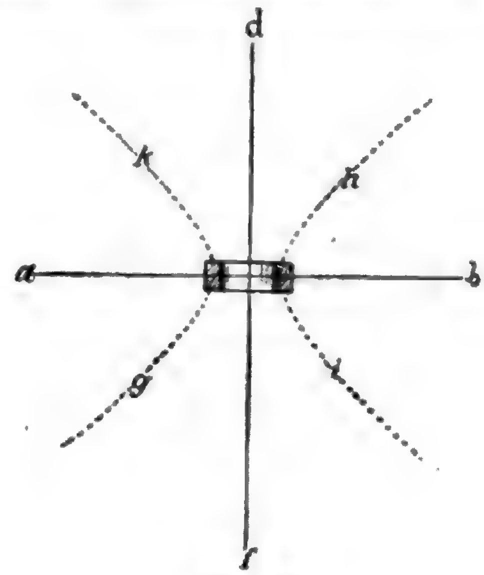


Fig. 15.

An den punktiert gezeichneten Stellen haben die von den entgegengesetzt schwingenden Zinken der Gabel herrührenden Bewegungsanstöße dauernd entgegengesetzt gleiche Größe, heben sich also auf; an diesen Stellen ist also der Ton der Stimmgabel nicht zu hören, während er bei a, d, b und f laut zu hören ist. Schaltet man die Wirkung der einen Zinke aus, indem man über sie ein enges Röhrchen schiebt, so hört man den Schall sofort wieder überall. Beim Drehen der Stimmgabel vor dem Ohr um ihre Achse hört man den Ton bei einer vollen Umdrehung 4 mal an- und abschwellen.

12b) Schwebungen. Beim Zusammenklang zweier Töne, deren Schwingungszahlen nur wenig voneinander verschieden sind, entstehen abwechselnd Anschwellungen und Abnahmen der Tonstärke, die man Schwebungen nennt; die Maxima der Tonintensität heißen Stöße. Ihre Anzahl in der Sekunde ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen beider Töne. Hat z. B. der eine

Ton 100, der andere 101 Schwingungen pro Sekunde, und senden in irgendeinem Augenblick beide eine Verdichtung ans Ohr, so verstärken sie ihre Wirkung gegenseitig. Nach einer halben Sekunde hat der erste Ton 50 Schwingungen ausgeführt, so daß das Ohr von ihm wieder eine Verdichtung empfängt; der andere Ton hat jedoch $50\frac{1}{2}$ Schwingungen gemacht; von ihm aus erreicht also eine Verdünnung das Ohr in diesem Augenblick, so daß der Ton ausgelöscht wird. Nach einer ganzen Sekunde wird das Ohr wieder von beiden Tönen her von einer Verdichtung getroffen, der Ton also verstärkt usw.

Auf diese Erscheinung der Schwebungen zweier Töne hat Helmholtz seine Theorie der Konsonanz und Dissonanz aufgebaut, indem eine Zahl von etwa 30 Schwebungen in der Sekunde einen unangenehmen intermittierenden Reiz gibt, was das Wesen der Dissonanz ausmachen soll. Näheres in dem Artikel „Klang".

12c) Kombinationstöne. Klingen zwei kräftige Töne zusammen, deren Schwingungszahlen nicht zu nahe beieinander liegen, so hört man, wie zuerst Sorge und Tartini fanden, außer den beiden Primärtönen noch neue, meist ziemlich schwache Töne, die „Kombinationstöne". Liegen die Töne weniger als eine Oktave auseinander, so hört man wesentlich einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Differenz h—t der Schwingungszahlen h und t der beiden Primärtöne ist, den sogenannten ersten Differenzton, daneben jedoch auch den Ton 2t—h. Steht h zu t etwa im Intervall der Quinte, so hört man beide Töne etwa gleich stark. Schwach, aber sicher nachgewiesen ist ferner noch der „Summationston" h + t, sowie noch sehr schwach die weiteren Differenztöne 2h—t, 3t—2h, 4t—3h, 3h—2t und 4h—3t (Stumpf). Solange nur der erste Differenzton h—t bekannt war, schien die Erklärung einfach zu sein. Da seine Schwingungszahl gleich der Anzahl der Stöße ist, die beide Töne miteinander geben, so wurde seine Entstehung im Sinne der Seebeck-Young-Königschen Theorie des Hörens, wonach jede Art von Periodik einen Ton von entsprechender Schwingungszahl hervorrufen soll, so gedeutet, daß die Stöße bei genügender Frequenz als Ton, eben als der Differenzton h—t, empfunden werden. Im Sinne dieser Erklärung nennt man noch heute gelegentlich die Kombinationstöne „Stoßtöne" (R. König). Diese Erklärung ist aber unmöglich aus mehreren Gründen, von denen nur die wichtigsten genannt seien. Erstens würde diese Erklärung nur für den ersten Differenzton h-t passen, nicht aber für die übrigen Kombinationstöne, insbesondere nicht auf den Summationston h + t. Ferner hört man die Schwebungen auch wenn die Primärtöne schwach sind, die Kombinationstöne dagegen nur bei starken Primärtönen; außerdem hört man noch bis zu mehreren Hunderten pro Sekunde die Schwebungen, während daneben der erste Differenzton ebenfalls längst hörbar ist. Endlich ist diese Erklärung der Differenztöne nicht in Uebereinstimmung mit der sonst so vielfach bestätigten Ohmschen Theorie des Hörens, wonach nur sinusförmige Schwingungen einfache Tonempfindungen liefern. Alle diese Schwierigkeiten fallen fort bei der von Helmholtz aufgestellten Theorie der Kombinationstöne. Nach dieser entstehen die Kombinationstöne immer dann, wenn die Stärke der Primärtöne so groß ist, daß nicht mehr das Gesetz der ungestörten Superposition zweier Einzelbewegungen gilt. Dieses Gesetz gilt so lange als die Bewegungen so klein sind, daß die Bewegungskräfte, die durch die Verschiebungen der kleinsten Teile des schwingenden Mittels gegeneinander hervorgerufen werden, diesen Verschiebungen proportional sind. Sind die Schwingungen so groß, daß auch noch das Quadrat der Verschiebung auf die Bewegungen Einfluß bekommt, so entstehen außer den primären Tönen auch die Kombinationstöne, und zwar wird hierdurch insbesondere auch das Auftreten des „Summationstones" h + t erklärt.

Kombinationstöne werden also besonders auch stark entstehen, wenn zwei Primärtöne auf einen elastischen Körper treffen, bei dem auch schon bei kleinen Verschiebungen aus der Ruhelage eine elastische Gegenkraft R von der Form $R = ax + bx^2$ geweckt wird. Diese Form setzt ein unsymmetrisches elastisches Verhalten des Körpers voraus, indem bei gleichen Verrückungen nach rechts und links ungleiche elastische Kräfte geweckt werden. Helmholtz wies darauf hin, daß die trichterförmige Gestalt des Trommelfells ein solches unsymmetrisches elastisches Verhalten in ihm bewirkt, so daß hierdurch die Kombinationstöne entstehen können. Es wird hierdurch auch folgende Schwierigkeit behoben. Stammen die beiden Primärtöne von zwei ganz getrennten Schallquellen, etwa zwei Stimmgabeln, so sind die Kombinationstöne ausgezeichnet zu hören, während sie lange Zeit objektiv mit Resonatoren nicht nachzuweisen waren, was doch nach der Helmholtzschen Theorie zu verlangen wäre. Das Trommelfell ist aber ein Gebilde, welches durch asymmetrischen Bau die Entstehung von Kombinationstönen an ihm sehr begünstigt. In den letzten Jahren ist nun mehrfach (K. L. Schaefer, Waetzmann) die objektive Existenz der Kombinationstöne auch außerhalb des Ohres nachgewiesen worden, ferner sind auch noch neue Erklärungsmöglichkeiten der Entstehung von Kombinationstönen im Ohr durch Erweiterungen des

Helmholtzschen Erklärungsprinzipes gegeben worden, durch welche gewisse Schwierigkeiten des Helmholtzschen Erklärungsansatzes vermieden werden (Cl. Schaefer, F. A. Schulze). Immerhin sind die Einwände gegen die Helmholtzsche Erklärung der Kombinationstöne noch nicht ganz verstummt; insbesondere bestehen noch Schwierigkeiten in bezug auf die Intensitätsverhältnisse der Kombinationstöne. Es darf aber wohl als sicher angenommen werden, daß die Helmholtzsche Hypothese wenigstens im Prinzip das Wesen der Sache trifft.

13. Sekundäre Klangerscheinungen. 13a) Variationstöne. Wird ein Ton von der Schwingungszahl n pro Sekunde u-mal in der Sekunde unterbrochen oder periodisch u-mal in der Sekunde in seiner Intensität variiert, so müßte nach der Ansicht von Seebeck-Joung-R. König, wonach das Ohr jede Art von Periodik als entsprechenden Ton empfinde, neben dem primären Ton n noch der Ton u gehört werden als „Unterbrechungston". Da der Ton u unter gewissen Umständen wirklich gehört wird, schien diese Ansicht bestätigt. Eine genaue Prüfung hat jedoch diese Ansicht als irrig erwiesen, und im Gegenteil die Ohmsche Theorie des Hörens bestätigt. In sehr eingehenden Versuchen von K. L. Schaefer und Abraham wurde gezeigt, daß neben dem Ton n im allgemeinen noch Töne von den Schwingungszahlen $n \pm u$, $n \pm 2u$, $n \pm 3u \ldots$ gehört werden, die auch objektiv im Unterbrechungsklang enthalten und durch Resonatoren verstärkbar sind. Ein objektiver Ton u tritt nur auf, wenn zufällig n ein ganzzahliges Vielfaches von u ist, außerdem kann er oft als Differenzton von n und $n \mp u$ gehört werden.

Wie später gezeigt wurde, ist dieses Verhalten genau dasjenige, welches nach der Ohmschen Theorie des Hörens, wonach das Ohr nur sinusförmige Schwingungen als Ton empfindet, eintreten muß (F. A. Schulze). Man nennt die Töne $n \mp u$, $n \mp 2u$, usw. Variationstöne. Helmholtz hat bereits die Töne $n - u$ und $n + u$ erhalten und erklärt. Man kann die Variationstöne leicht demonstrieren, indem man die Oeffnung des Resonanzkastens einer tönenden Stimmgabel vor eine rotierende Scheibe hält, die äquidistante Löcher enthält, deren Größe gleich derjenigen der Resonatoröffnung ist.

13b) Reflexionstöne. Aehnlich wie der Unterbrechungston u sind auch die sogenannten Reflexionstöne (Baumgarten) zunächst als Beweis für die Richtigkeit der Seebeckschen Theorie des Hörens angesehen worden. Es sind dies diejenigen Töne, die man hört, wenn man vor einer Wand steht, in deren Nähe ein Geräusch, etwa eines Wasserfalles, eines rollenden Eisenbahnzuges oder dgl. vorhanden ist. Auch die Töne, die man in einer Straße beim Klatschen mit der Hand, Auftreten mit dem Fuß usw. hört, gehören hierher. Die Höhe dieses Tones nimmt zu, wenn man sich der Wand nähert. Er ist früher erklärt durch die beiden Impulse, die das Ohr nacheinander beim Hingang des Geräusches zur Wand und dann nach der Reflexion beim Rückgang erhält, mit Hinzunahme der Tatsache, daß zwei Impulse zur Erkennung der Schwingungszahl genügen. Einfacher und naturgemäßer dürfte jedoch die Erklärung sein, daß die zahlreichen in dem Geräusch enthaltenen Töne verschiedener Schwingungszahl vor der Wand durch Reflexion stehende Wellen bilden; man hört dann immer diejenigen Töne am stärksten, in deren Knoten sich das Ohr gerade befindet. Auch das Ansteigen der Tonhöhe bei Annäherung an die Wand ist hiermit erklärt (Starke). Eine zweite Art von Reflexionstönen entsteht durch Reflexion eines Knalles oder Schusses an Gittern, Zäunen, Pfeilern usw., wobei also die einmalige Luftverdichtung in regelmäßigen Impulsen nach der Reflexion an den einzelnen Gitterstäben zum Ohr des Beobachters gelangt. Wir haben hier eine ähnliche Tonerzeugung wie bei den Sirenen. Die berechneten Tonhöhen stimmen gut mit den beobachteten überein (Oppel).

14. Physiologisches (siehe Ausführliches im Artikel „Gehörsinn"). 14a) Bau des Ohres. Nachdem der Schall den äußeren Gehörgang passiert hat, setzt er zunächst das Trommelfell in Schwingung, welches das innere Ohr nach außen abschließt. An diesem ist das eine Ende der drei gelenkartig miteinander verbundenen Gehörknöchelchen, Hammer, Amboß, Steigbügel, befestigt, welche die Bewegung des Trommelfells weiter führen auf die im Labyrinth befindliche Flüssigkeit, die sich in einer knöchernen Wandung befindet und durch zwei Membranen, das runde und ovale Fenster, verschlossen ist; auf letzterem ist die Fußplatte des Steigbügels befestigt. Im Labyrinth befindet sich nun die Schnecke, analog dem Schneckengehäuse gebaut. In seiner ganzen Länge ist eine dünne Scheidewand ausgespannt, die Basilarmembran, die vermöge ihrer radialen Spannung wie schon erwähnt (6a) als Nebeneinanderlagerung von schwingungsfähigen Gebilden verschiedenster Schwingungszahlen wirkt. Durch Resonanz setzen die ankommenden Schallwellen die entsprechenden Fasern in Schwingung, und erzeugen die entsprechenden Tonempfindungen, indem die schwingenden Fasern die ihnen zugehörenden Nervenendigungen reizen (Helmholtzsche Resonanztheorie des Hörens).

14b) Grenzen der Tonempfindung. Die untere Hörgrenze liegt bei etwa 24 v.d. (Helmholtz, Schaik, K. L. Schaefer). Wesentlich tiefere Angaben (8, sogar 4) haben sich als irrig herausgestellt, indem die Tonquellen nicht frei von Obertönen waren.

Während die untere Hörgrenze früher zu tief angesetzt wurde, waren die Angaben für die obere Hörgrenze früher viel zu hoch (50000 v. d. und mehr). Neuere Untersuchungen (F. A. Schulze, Stumpf, Hegener) haben die obere Hörgrenze übereinstimmend zu etwa 20000 v. d. ergeben.

14c) Empfindlichkeit des Ohres für Töne verschiedener Höhe und Stärke. Das Ohr hat ein ausgesprochenes Maximum der Empfindlichkeit für die mittleren Töne des musikalischen Tonbereiches, bei ungefähr 1500 bis 2000 v. d., von wo es nach beiden Seiten abnimmt bis auf ganz außerordentlich kleine Bruchteile der Maximalempfindlichkeit (M. Wien).

Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonstärken ist sehr gering. Ein Schall muß etwa 15% stärker werden, damit das Ohr den Intensitätsunterschied eben merkt (M. Wien). Dagegen ist die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen bei geübten musikalischen Personen ganz enorm. Es kann von solchen noch ein Unterschied der Tonhöhe bei einer Differenz von einer Viertelschwingung erkannt werden.

14d) Minimum der Schallimpulse. Die Frage nach dem Minimum von Schwingungen, die zur Erkennung der Tonhöhe erforderlich ist, ist dahin beantwortet worden, daß bereits bei zwei Schwingungen eine gewisse, jedoch in bezug auf Erfassung der Tonhöhe noch ungenaue Tonempfindung wahrgenommen wird, daß zur völligen Klarheit jedoch 15 bis 20 Schwingungen nötig sind.

Literatur. **E. F. F. Chladni**, *Die Akustik. Leipzig 1802.* — **H. v. Helmholtz**, *Die Lehre von den Tonempfindungen, 1. Aufl., Braunschweig 1862; seitdem in mehreren Auflagen erschienen. Grundlegendes auch für Laien verständliches Werk.* — **J. Tyndall**, *Sound. London 1867. Deutsch von A. v. Helmholtz und A. Wiedemann, 3. deutsche Auflage. Braunschweig 1897.* — **F. Melde**, *Akustik. Leipzig 1883.* — **L. A. Zellner**, *Vorträge über Akustik, 2 Bde., Wien 1892.* — **W. C. L. van Schaik**, *Wellenlehre und Schall, deutsch von Fenkener. Braunschweig 1902.* — **Lord Rayleigh**, *Theory of Sound, 2 Bde. London 2. Auflage 1894 bis 1896. Deutsche Ausgabe: Theorie des Schalles, von F. Neesen. Braunschweig 1880. Ausführliches Werk über theoretische Akustik.* — **H. v. Helmholtz**, *Vorlesungen über die mathematischen Prinzipien der Akustik, herausgegeben von König und Runge. Leipzig 1898.* — **C. Stumpf**, *Tonpsychologie, 2 Bde. Leipzig 1883 bis 1890.* — **Derselbe**, *Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft, Leipzig, seit 1898.* — **A. Jonquière**, *Grundzüge der musikalischen Akustik.* — **K. L. Schaefer**, *Der Gehörsinn in Nagels Handbuch der Physiologie. Bd. III. Braunschweig 1905.* — **R. A. Kielhauser**, *Die Stimmgabel. Leipzig 1907.* — **H. Starke**, *Physikalische Musiklehre. Leipzig 1908.* — **F. Auerbach**, *Akustik. Als II. Band der 2. Auflage von Winkelmanns Handbuch der Physik. Leipzig 1909. Umfassendste Darstellung der gesamten physikalischen Akustik mit ausführlichen Literaturangaben.* — **A. Kalähne**, *Grundzüge der mathematisch-physikalischen Akustik, I. Teil. Leipzig 1910.* — **E. Waetzmann**, *Die Resonanztheorie des Hörens. Braunschweig 1912.* — *Ferner die Abschnitte über Akustik in den Lehrbüchern der Physik von Müller-Pouillet, Wüllner, Chwolson.*

F. A. Schulze.

Scharung der Gänge.

Das Zusammentreten getrennter Gänge zu einem einzigen Gang (vgl. den Artikel „Lagerungsform der Gesteine").

Schauapparate

siehe den Artikel „Bestäubung".

Schaudinn

Fritz Richard.

Geboren am 19. September 1871 in Roeseningken in Ostpreußen, gestorben am 22. Juni 1907 in Hamburg. Studierte in Berlin Naturwissenschaft, insbesondere Zoologie, und promovierte 1894, worauf er eine Reise nach Norwegen antrat, um in Bergen Studien über Meeresrhizopoden zu machen. Nach seiner Rückkehr, Oktober 1894, wurde er Assistent am Zoologischen Institut in Berlin und habilitierte sich daselbst 1898 als Privatdozent. Er hat sich von Anfang an den Protozoen zugewandt. Schon seine ersten Arbeiten betrafen die Morphologie, Fortpflanzung und Entwickelung der bis dahin noch wenig erforschten Foraminiferen (Ztschr. f. wiss. Zool., Vol. 59, 1895). Er entdeckte in dieser Zeit den Vorgang der multiplen Kernvermehrung (Biol. Centralbl., Vol. 14, 1894) und bei seinen Untersuchungen an Amöben konnte er zum ersten Male feinere Kernteilungsvorgänge (Mitose bei Amoeba binucleata) feststellen. Von grundlegender Bedeutung wurden dann ferner seine Beobachtungen über die primitiven Befruchtungsvorgänge bei den Protozoen, die diese den Metazoen näher brachten, er wies z. B. eine echte Oogamie bei Coccidien nach, die der Eibefruchtung der Metazoen vergleichbar ist (Sitzungsber. Akad. Berlin,

1896). — Im Mai 1898 trat Schaudinn eine Reise mit seinem Freunde Fr. Römer und dem Tiermaler Friese in das Eismeer an und sammelte ein großes Material, das von ihm und Fr. Römer in Verbindung mit anderen Gelehrten verarbeitet und in dem Werke „Fauna Arctica" veröffentlicht wurde. Nach seiner Rückkehr wandte er sich ganz dem Generationswechsel bei Protozoen zu, der zwischen ungeschlechtlichen und geschlechtlichen Generationen besteht und kam zur Feststellung der sogenannten Entwicklungskreise der Protozoen. Auch bei den erfolgreichen Untersuchungen zur Entwickelung der Malariaerreger hat er durch seine Coccidienuntersuchungen die Grundlage geliefert und auch selbst das Malariaproblem der Lösung näher gebracht. Auf Grund dieser Arbeiten wurde er 1901 im Auftrage des Kaiserlichen Gesundheitsamtes nach Rovigno geschickt, um die Biologie der pathogenen Protozoen zu erforschen. Hier entstanden die für die Protistenkunde wichtigsten Arbeiten, die zum Teil aber unvollendet bleiben mußten. Besonders bedeutungsvoll war die Feststellung des Generations- und Wirtswechsels bei Halterium und Leukocytozoon, zweier im Blute von Eulen schmarotzender Protozoen. Er konnte hier den aufsehenerregenden Nachweis erbringen, daß sie Spirochäten- und Trypanosomenstadien durchlaufen.

Im Jahre 1904 wurde Schaudinn an das Kaiserliche Gesundheitsamt nach Berlin berufen und wurde hier der Leiter der neugegründeten Abteilung für Protistenkunde. Im Frühjahr 1905 fand er, gleichsam als Abschluß seiner früheren Spirochätenstudien, den oft vergeblich gesuchten Erreger der Syphilis, die Spirochaeta pallida, und machte so seine für die Menschheit bedeutendste Entdeckung. In seinem letzten Lebensjahre folgte Schaudinn einem Ruf als Leiter der von ihm gegründeten Protozoenabteilung an das Institut für Schiffs- und Tropenhygiene nach Hamburg, wo er endlich eine ihm zusagende Stellung gefunden hatte. Doch der Tod bot seinem jungen, an Hoffnung reichen Leben jähen Einhalt.

Literatur. *M. Hartmann und S. v. Provazek, Nekrolog in dem von Schaudinn 1903 gegründeten Archiv für Protistenkunde, Bd. 8, 1907.*

W. Harms.

Scheele

Karl Wilhelm

Geboren am 9. Dezember 1742 in dem damals schwedischen Stralsund, gestorben in Köping am 21. Mai 1786, gehört zu den hervorragendsten Chemikern jener Zeit, die man als Sturm- und Drangperiode in der Entwickelung der Chemie bezeichnen kann. Eine gleiche Schärfe der Beobachtung, eine solche Gabe, mit geringfügigen Mitteln und selbstgeschaffenen Methoden wichtigste Entdeckungen zu machen, wird sich wohl kaum bei einem anderen Forscher finden. Schon als junger Apothekergehilfe in Malmö und Stockholm bis um 1770, drang Scheele, ganz auf sich selbst angewiesen, durch eigene Versuche tief in das Gebiet der anorganischen Chemie ein, um dann in Upsala 1770—1775 und in Köping, nachdem er durch Uebernahme einer Apotheke selbständig geworden war, durch seine grundlegenden Beobachtungen und glänzenden Entdeckungen im Gesamtgebiet der Chemie alle Forscher in Staunen zu setzen. Längere Zeit blieben seine Untersuchungen unbeachtet, da es ihm zunächst an Mitteln fehlte, sie genügend bekannt zu machen. Die verdienstvolle Herausgabe seiner Briefe und Laboratoriumsaufzeichnungen durch A. E. Nordenskjöld (Stockholm 1892) hat den Beweis geliefert, daß Scheele schon vor Veröffentlichung seines fundamentalen Werkes „Chemische Abhandlung von der Luft und dem Feuer" (1777) im Besitz der grundlegenden Entdeckung des Sauerstoffes gewesen ist, den er vor Priestley, der häufig noch als erster Entdecker genannt wird, auf verschiedenen Wegen darstellte und seinem Wesen nach kennzeichnete. So trug er mit Priestley am meisten dazu bei, daß Lavoisier seine die ganze Chemie reformierende Oxydationslehre aufstellen konnte.

Ferner führte er in seiner Abhandlung über den Braunstein (1774) der Chemie außer dem Sauerstoff drei neue Stoffe zu: das Chlor, das Mangan und die Baryterde, von denen jeder eine bedeutsame Rolle gespielt hat. Für die anorganische Chemie waren seine Untersuchungen über die Flußsäure, Molybdän- und Wolframsäure, Arsensäure sowie über Arsenwasserstoff bahnbrechend, da es sich um die Erforschung ganz neuer chemischer Verbindungen handelte. Auf dem noch kaum bebauten organisch-chemischen Gebiete gelang es Scheele, dank seiner wunderbaren Gabe, scharf zu beobachten und Wege zur Auffindung neuer Stoffe zu ermitteln, eine Reihe wichtigster im Pflanzen- und Tierkörper vorkommender Säuren darzustellen und zu kennzeichnen. Dazu gehört die Oxal-, Aepfel-, Wein-, Zitronen-, Gallus- Milch-, und Harnsäure, sowie die Blausäure. Auch Glycerin, von ihm „Oelsüß" genannt, stellte er zuerst durch Verseifung von Fetten her.

Seine inhaltreichen Abhandlungen sind seit 1774 regelmäßig in den Schriften der Schwedischen Akademie (Vetensk. Acad. Handl.) veröffentlicht. In vollem Umfange wurden seine Verdienste als eines Bahnbrechers erst gewürdigt, als eine Gesamtausgabe seiner Abhandlungen erschien, und zwar in deutscher Sprache von Hermbstädt 1793 herausgegeben unter dem Titel: „Sämtliche physische und chemische Werke Scheeles". Seine oben genannte 1777 erschienene Schrift hatte zuerst die Aufmerksamkeit auf ihn gelenkt, ohne daß sofort seine volle Bedeutung erkannt wurde.

E. von Meyer.

Scheerer

Karl Johann August Theodor

Geboren am 28. August 1813 in Berlin, ist am 19. Juli 1875 in Dresden gestorben, wo er einige Jahre im Ruhestand gelebt hat, nachdem er

seit 1848 als Professor der Chemie und Hüttenkunde an der Bergakademie Freiberg tätig gewesen war (früher schon als Mineraloge in Christiania). Seine chemischen Untersuchungen umfassen große Gebiete der Mineralanalyse, die er durch Verbesserung analytischer Methoden vertieft hat. Seine mannigfaltigen Forschungen haben zur Klärung petrographischer und geognostischer Fragen beigetragen; auch wertvolle Arbeiten kristallographischer Richtung rühren von ihm her; namentlich hat er die Erscheinungen einer eigentümlichen Isomorphie, den sogenannten polymeren Isomorphismus beobachtet. Sein Lötrohrbuch, zuerst 1857 erschienen, war für den Chemiker wie für den Mineralogen und den Hüttenmann wichtig.

Scheerer hat seine Forschungen meist in Poggendorffs Annalen und im Journal für praktische Chemie, zum Teil in Liebigs Annalen veröffentlicht; einige mineralogisch-geologische Arbeiten sind im neuen Jahrbuch der Mineralogie und in den Berichten der deutschen geologischen Gesellschaft erschienen.

E. von Meyer.

Scheiner
Christoph.

Geboren 1575 in Walda bei Mindelheim in Schwaben, gestorben am 18. Juli 1650 in Neiße. Er war Jesuit, bis 1610 Professor in Freiburg i. B., dann in Ingolstadt und Rom, von 1623 an Rektor des Jesuitenkollegiums in Neiße. Scheiner war einer der ersten Beobachter der Sonnenflecken. Da ihm jedoch von seinen Vorgesetzten Stillschweigen über seine Entdeckung auferlegt wurde, kam diese erst 13 Jahre später (1611) zur Veröffentlichung und verwickelte ihn in einen Prioritätsstreit mit Galilei. Scheiner konstruierte für seine Beobachtungen das erste Fernrohr mit 2 konvexen Linsen. Er unternahm eine Reihe von optischen Untersuchungen, u. a. konstatierte er, daß auf der Netzhaut wirkliche Bilder entstehen.

Literatur. *Braunmühl, Christoph S. Bamberg 1891.*

E. Drude.

Scheinflächen.

Unechte Kristallflächen, welche durch Anstoßen des wachsenden Kristalls an andere Kristalle oder ebene Gegenstände oder auch durch Wachstumserscheinungen des Kristalls selbst hervorgebracht werden. Im ersteren Falle genügen die Flächen nicht dem Gesetz von den rationalen Achsenabschnitten, im letzteren sind sie rauh und uneben (vgl. den Artikel „Kristallformen“).

Schichtenbau.

Einleitung. Epirogenetische und orogenetische Bewegungen. Lagerungsstörungen. Die Bewegungen innerhalb der festen Erdkruste sind, wenn man von den durch vulkanische Ereignisse hervorgebrachten und den Einstürzen infolge von Auslaugung unterlagernder Schichten, die beide nur eine beschränkte Verbreitung haben, absieht, teils epirogenetische (d. h. festlanderzeugende, auch säkulare Hebungen und Senkungen genannt), teils orogenetische (d. h. gebirgsbildende). Die epirogenetischen vollziehen sich einerseits in der Wechselwirkung zwischen den Geosynklinalen und den Kontinentalfeldern, andererseits innerhalb dieser Regionen in der Form von schild- oder buckelförmigen Auftreibungen, wallförmigen Erhebungen, becken- und trogförmigen Einsenkungen von großem Ausmaß. Die orogenetischen Bewegungen, die z. T. nur graduell von den epirogenetischen verschieden sind, führen zu einer Umwandlung der ursprünglichen, ungestörten Lagerungsverhältnisse der Gesteine in gestörte. Die Erforschung des Baues der Erdkruste, soweit derselbe das Ergebnis von Dislokationen im fertigen Gestein ist, bildet die Aufgabe der Tektonik (Lehre vom Schichtenbau), eines Zweiges der Geologie („geotektonische Geologie“).

Unter einer **Dislokation** (Krustenbewegung, Diastrophismus, Lagerungsstörung, Störung) versteht man jede Bewegung eines Gesteinskörpers oder eines Stückes der festen Erdrinde innerhalb dieser letzteren, die denselben aus seiner ursprünglichen Lage bringt, d. h. aus derjenigen, die er bei seiner Bildung bekommen hat. Man versteht darunter dann ferner jede veränderte Lage (Biegung, Neigung, Aufrichtung) oder jede Unterbrechung im ursprünglichen Zusammenhange (Zerreißung, anormaler oder mechanischer Kontakt) eines Gesteinskörpers, die das Ergebnis einer solchen Bewegung ist, sowie jede Fläche (Dislokations-, Bewegungsfläche), an der sich eine Bewegung vollzogen hat, sowie endlich den linear gestalteten Schnitt einer Bewegungs- mit der Erdoberfläche (Dislokationslinie).

Man teilt die Dislokationen in tangentiale, d. h. im wesentlichen tangential zum Erdball, und radiale, d. h. im wesentlichen in der Richtung des Erdradius gerichtete. Nach den beiden hauptsächlichen Typen von Störungen innerhalb dieser beiden Kategorien kann man auch die Gruppe der Faltungen und die der Verwerfungen unterscheiden. In jener findet durch Stauchung eine Zusammenpressung statt („kompressive Bewegungen"), in dieser spielen Zerreißungen, Zerrungen, Einbrüche („disjunktive Bewegungen") die Hauptrolle.

Eine tektonische Einheit ist ein Stück der Erdkruste, das sich einer Dislokation gegenüber wie ein Ganzes verhält oder durch eine solche zu einer tektonisch begrenzten Masse geworden ist. Man unterscheidet tektonische Einheiten höherer und niederer Ordnung. Als tektonisch verschieden bezeichnet man Gebiete, in denen verschiedene Dislokationstypen (-systeme) herrschen.

Auf das Bild der Dislokationen in den Einzelheiten hat die Beschaffenheit der dislozierten Gesteine einen nicht unwesentlichen Einfluß, namentlich die Härte, Weichheit, gute, schlechte oder fehlende Schichtung usw.

Die Entstehung der Dislokationen ist im letzten Grunde auf die Abkühlung der Erde und ihre Kontraktion zurückzuführen. Die Lehre vom Schichtenbau beschäftigt sich in erster Linie mit der Morphologie, dann mit dem Mechanismus der Dislokationen, weniger mit den Ursachen ihrer Entstehung (vgl. den Artikel „Gebirgsbildung").

Nur selten ist der Mensch Zeuge bei der Entstehung einer Dislokation. Meist muß der Vorgang aus seinem Ergebnis beurteilt werden.

A. Tangentiale Dislokationen.

Unter Faltung versteht man diejenige Lagerungsstörung, bei der die Schichten durch Zusammenstauchung aus ihrer ursprünglichen horizontalen (söhligen) Lagerung oder ihrem ursprünglichen Ablagerungsniveau gebracht sind, so daß sie sich abwechselnd aufrichten und absenken. Schichten, die in dieser Weise disloziert sind, zeigen einen Faltenwurf (Fig. 33).

1. Falten. 1a) Die Falte und ihre Teile. Unter einer Falte versteht man einen im wesentlichen einmalig gebogenen Schichtkomplex. Die unter einem Winkel gegeneinander geneigten oder parallelen, durch die Biegung miteinander verbundenen Schichtkomplexe heißen ihre Schenkel (Fig. 2, S) oder Flügel. Die Schichten derselben sind aufgerichtet oder geneigt. Einfache Falten sind solche mit geraden, nicht gefalteten Schenkeln. Normale Falten haben gleich starke Schenkel. Das Innerste einer Falte nennt man den Faltenkern (Kern) (Fig. 2, K), das Aeußerste ihrer Biegung ihren Scheitel (Fig. 2, Sch). Eine Antiklinale oder ein Sattel (Gewölbe) ist eine Falte, bei der die ältesten Schichten im Kern, die jüngsten im Scheitel liegen, eine Synklinale oder Mulde eine solche, bei der die jüngsten Schichten im Kern, die ältesten im Scheitel liegen. Die innersten Teile eines Sattels und einer Mulde nennt man Sattel- oder Gewölbekern(-innerstes) und Muldenkern(-innerstes)(Fig. 2) ihre Umbiegungsstellen Sattel- oder Gewölbe- und Mulden(um)biegung. Unter der Achsenebene einer Falte versteht man die (meist ebene) Fläche, die die Scheitel aller einzelnen Schichten einer Falte schneidet (Fig. 4). Sie halbiert keineswegs immer den Winkel zwischen den Faltenschenkeln. Mit der Symmetrieebene fällt sie nur bei symmetrischen Falten zusammen. Als solche bezeichnet man Falten mit gleich großer Neigung der Schenkel. Nur gerade, liegende und Isoklinalfalten (s. u.) können symmetrisch sein, alle anderen sind asymmetrisch.

Streichen und Fallen. Die Lage der Schenkel einer Falte, überhaupt aufgerichteter (geneigter) Schichten, wird durch das Streichen und das Fallen bestimmt. Das Streichen ist die Richtung der einzigen horizontalen Geraden, die man auf der Schichtfläche einer geneigten Schicht ziehen kann. Das Fallen (Einfallen) ist die Richtung der größten Neigung einer Schicht. Die Falllinie liegt in der geneigten Schichtebene senkrecht zur Streichlinie (Fig. 1).

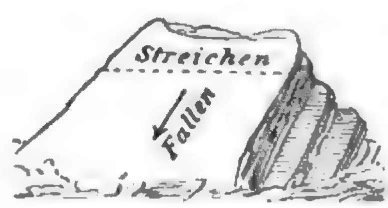


Fig. 1. Aufgerichtete (geneigte) Schichten mit Angabe der Streich- und Falllinie. Nach Kayser.

Beim Fallen muß außer der Richtung auch der Winkel der Schichtebene mit der Horizontalen (Einfalls-, Fallwinkel) angegeben werden. Horizontal gelagerte Schichten haben kein Streichen und Fallen. Schichten mit 90° Fallen stehen saiger.

1b) Arten der Falten. α) Aufrechte Falten. Eine aufrechte Falte ist eine Falte mit senkrechter oder (nicht bis zur Horizontalität) geneigter Achsenebene. Spricht man kurzweg von einem Gewölbe, Sattel (einer Mulde), so meint man damit aufrechte Sattel(Mulden)falten, deren Schenkel zum Scheitel (oder First) nach oben (unten) hin konvergieren, also gewölbe- oder dachförmig (resp. trog- oder bootförmig) sind. Nach dem Winkel, den die Schenkel mit der Horizontale bilden oder nach der Stellung der Achsenebene unterscheidet man folgende Arten von Falten (Sätteln, Mulden):

Die gerade oder stehende Falte (Fig. 2). Ihre Schenkel sind unter gleichem

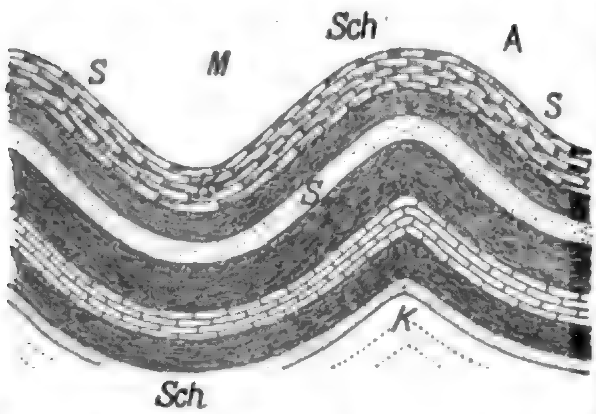


Fig. 2. Einfache, normale, symmetrische, aufrechte, gerade Synklinale (M) und Antiklinale (A). S Schenkel, Sch Scheitel, K Kerne. Nach Willis.

Winkel gegen die Horizontale geneigt, ihre Achsenebene steht senkrecht. Einen Sattel mit enger Wölbung (spitzem Winkel zwischen den Schenkeln) wird steil, ein solcher mit weiter Wölbung (stumpfer Winkel) flach genannt. Besondere Formen der geraden Falte sind die Kofferfalte (Fig. 3) mit



Fig. 3. Erodierte Kofferfalte (Weißensteinkette, Schweizer Jura). Nach Gerth.

dem Querschnitt eines Reisekoffers (flache Gewölbebiegung und mehr oder weniger rechtwinkliger Abfall der Schenkel), sowie die Fächerfalte mit leichter oder stärkerer Einbiegung der Schenkel gegen den Kern hin, wobei es sogar zur Abschnürung oder Abquetschung des Sattel(Mulden)-kernes kommen kann (Fig. 33 rechts).

Die schiefe oder geneigte Falte (Fig. 4). Ihre Schenkel fallen unter un-

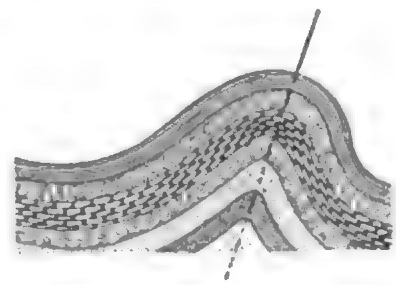


Fig. 4. Schiefe Falte. Die schräge schwarze Linie bezeichnet die Lage der Achsenebene. Nach Van Hise.

gleichen Winkeln in entgegengesetzter Richtung. Der eine Schenkel kann saiger, der andere muß flacher sein.

Alle nicht stehenden Falten neigen sich nach der der Herkunft des Gebirgsdrucks entgegengesetzten Richtung. Neigen sie sich (ausnahmsweise) dem Gebirgsdruck entgegen, so spricht man von Rückfaltung und Rückfalten (Fig. 15). Das Auftreten von Rückfalten auf der Innenseite von Kettengebirgsbogen wird wohl mit dem „Stoß ins Leere" erklärt, mit einem Rückwärtsausweichen, wo die Bewegungsfreiheit nur nach rückwärts gegeben war oder diese nach erfolgtem Abbruch an der Innenseite entstand.

Die überliegende (übergeneigte, übergelegte, überkippte, überschlagene) Falte (Fig. 5). Sie besitzt Schenkel

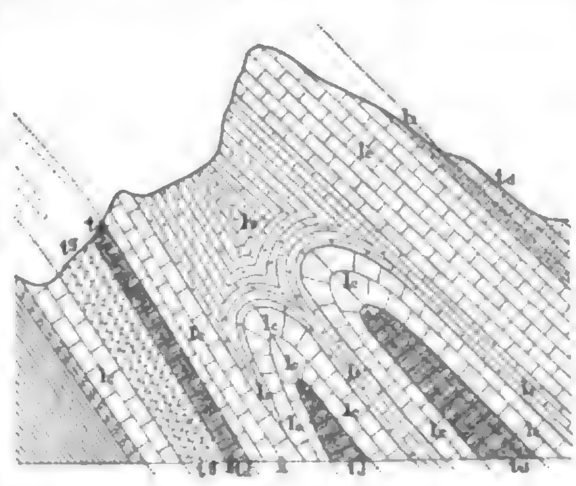


Fig. 5. Erodierte, zusammengesetzte, überliegende Mulde, geteilt durch zwei überkippte Spezialsättel. tg, td Trias, lc, ls Lias. Croix des Têtes, Arc-Tal, französische Alpen. Nach Kilian und Révil.

von verschiedener oder gleicher Neigung gegen die Horizontale, wobei der eine um mehr als 90° aufgerichtet oder, wie man sagt, „überkippt“ ist. Unter einer Ueberkippung versteht man also die Aufrichtung von Schichten um mehr als 90°. Die Schichten liegen geneigt, aber dabei die älteren Schichten über den jüngeren. Die Umbiegungen überkippter Falten sind häufig im Vergleich zu den Schenkeln verdickt.

Man spricht auch wohl von der Unterschiebung einer Mulde unter einen überliegenden Sattel in der Richtung gegen den Gebirgsdruck.

Eine besondere Art der überkippten Falte ist die Nickfalte, ein Sattel, der vorn



Fig. 6. Faltenbüschel einer brandenden, gefalteten, wurzellosen Ueberschiebungsdecke. In der Mitte große Nickfalte mit eingewickeltem Sattelkopf, rechts davon Fächerdoppelgewölbe. Reduktion der Mittelschenkel. c = Kreide, e = Eocän, m = Molasse. (Nord-Südprofil des Schrattenkalkes in den Falten des Säntisgebirges vor der Erosion.) Nach Alb. Heim.

kopfüber geneigt ist, so daß er eingewickelt erscheint und sein Kopf die Gestalt einer aufrechten Mulde besitzt (Fig. 6 Mitte).

β) Liegende und tauchende Falten. Die liegende Falte besitzt ganz oder annähernd horizontale Schenkel oder eine solche Achsenebene (Fig. 7).

Bei liegenden und überkippten Falten unterscheidet man bei gleichzeitiger Betrachtung einer durch den gemeinsamen Schenkel verbundenen Syn- und Anti-

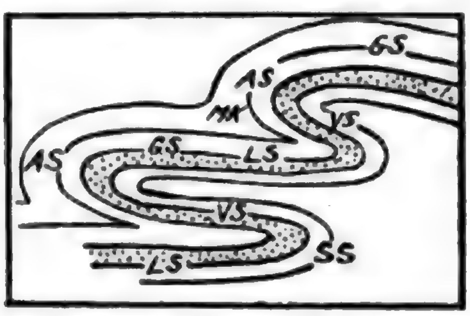


Fig. 7. Liegende Falten. GS hangender, VS verkehrter Mittel-, LS liegender Schenkel, AS Antiklinal-, SS Synklinalscharnier. MK Muldenkern. Nach C. Schmidt (geändert).

klinale die drei Schenkel mit besonderen Bezeichnungen als Gewölbe-, Mittel- und Muldenschenkel. In dem unteren und oberen Schenkel liegt die Schichtfolge normal, im mittleren aber verkehrt. Darauf gründet sich die noch bessere, weil ganz unmißverständliche Benennung (Fig. 7) (normaler) hangender Schenkel, verkehrter Mittelschenkel (auch überschlagener Flügel oder rückläufiger Schenkel), (normaler) liegender Schenkel.

Die Umbiegungen liegender Falten heißen Scharniere (Antiklinalscharnier = Sattel-, Synklinalscharnier = Muldenumbiegung (Fig. 7).

Es gibt liegende (und überkippte) Fächerfalten und Rückfalten. Liegende und tauchende Falten mit scharfem Scharnier nennt man Keile (Antiklinal- und Synklinalkeil) (Fig. 14). Enge liegende oder überkippte Falten, die in einem anderen Gestein stecken, bezeichnet man wohl als Einspitzungen. An ihren Scharnieren können liegende Falten abgequetscht werden, so daß Teile ihrer Scheitel zusammenhangslos inmitten anderer Gesteine vorkommen.

Eine weit vorstoßende liegende Falte, die auf größere Erstreckung den Untergrund, auf dem sie ruht, überdeckt, nennt man Deckfalte (Fig. 16), ihre Ausgangsstelle, genauer gesagt ihren Antiklinalkern resp. ihren Muldenscheitel, ihre Wurzel, ihr Antiklinalscharnier ihre Stirn.

Eine tauchende Falte oder Tauchfalte ist über die Horizontalität hinaus überkippt. Sie besitzt einen um mehr als 180° überkippten Mittelschenkel.

Bei tauchenden Sätteln und Mulden (Fig. 16, 22) wird, wenn der Ueberblick über ihre Gesamtgestalt fehlt, das Bild aufrechter Falten vorgetäuscht, aber die innere Anordnung ist völlig auf den Kopf gestellt: Ein tauchender Sattel (falsche oder Pseudomulde) ist eine Falte von der Gestalt einer aufrechten Mulde, aber mit einem Scheitel aus jüngerem Gestein unten und einem Kern aus älterem Gestein oben. In gleicher Weise besitzt eine tauchende Mulde (falscher oder Pseudosattel) die Gestalt eines aufrechten Sattels, aber mit einem Scheitel aus älterem Gestein oben und einem Kern aus jüngeren Schichten unten.

Auch bei liegenden und tauchenden Falten findet sich oft eine Verdickung der Scharniere.

γ) Isoklinalfalten. Falten mit gleichwinkligem Fallen der Schenkel nach der gleichen Richtung nennt man isoklinal. Es gibt aufrechte (gerade, überkippte), liegende und tauchende Isoklinalfalten (Fig. 8). Liegende Isoklinalfalten bezeichnet man meist als übereinanderliegende Falten. Bei geraden Isoklinalfalten stehen beide Schenkel saiger.

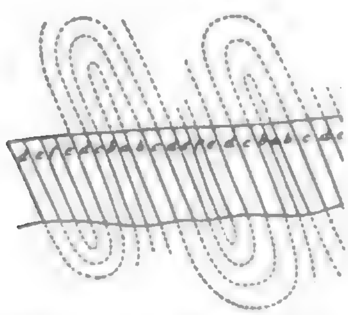


Fig. 8. Isoklinalregion. Bündel von überkippten Isoklinalfalten. Die beiden Querlinien bezeichnen die in der Natur sichtbaren Teile des Profils. Ergänzung der abgetragenen Falten durch Luftsättel. Abwechselnd normale und verkehrte (überkippte) Schichtfolge. Nach Haug.

1c) *Reduktion des Mittelschenkels, Faltenüberschiebung.* Bei den überkippten, liegenden und tauchenden Falten ist die Schichtfolge des verkehrten Mittelschenkels oft nicht in ihrer ursprünglichen *wahren Mächtigkeit* vorhanden, sondern erscheint *reduziert* („*reduzierter Mittelschenkel*"). Die *Reduktion des Mittelschenkels* entsteht durch die Bewegung des hangenden Schenkels über den liegenden hin oder eine Unterschiebung des liegenden Schenkels unter den hangenden. Der Mittelschenkel wird bei diesem Vorgang *verdünnt, ausgedünnt, ausgezogen, zer-*



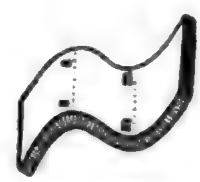
Fig. 9. Ueberkippte Falten mit reduziertem (a), verquetschtem (b), und verloren gegangenem (c) Mittelschenkel. c = Faltenüberschiebung mit teilweiser Schleppung. Nach Alb. Heim.

rissen, verdrückt, verquetscht, ausgequetscht, ausgewalzt. Eine Falte mit einem auf diese Weise schließlich *verloren gegangenen* Mittelschenkel besteht nur aus dem hangenden und dem liegenden Schenkel, also zwei normalen Schichtfolgen (Fig. 9).

Bei vollständiger Zerreißung des Mittelschenkels entsteht eine *Faltenüberschiebung* (auch wohl *Ueberschiebungsfalte* genannt; Fig. 9c). Sie besteht in einer schräg aufsteigenden Fläche, an der zwei normale Schichtfolgen so aneinander grenzen, daß oberhalb der Dislokationsfläche die einzelnen Glieder der Schichtfolge jeweils höher liegen als unter ihr. Im Unterschied von den Schollenüberschiebungen (s. S. 893) läuft die Faltenüberschiebung stets in der Achsenebene eines Sattels. In der Faltenüberschiebung können Reste des Mittelschenkels erhalten sein. An ihr biegen sich oft die Schichten des hangenden Schenkels nach unten, die des liegenden nach oben. Eine solche *Schleppung* entsteht durch das Zurückbleiben der Schichtenden an der Bewegungsfläche infolge des Reibungswiderstandes der beiden Schenkel aneinander. Die Ueberschiebung des hangenden Schenkels über den liegenden vollzieht sich bei aufrechten Falten vor- und aufwärts, bei tauchenden vor- und abwärts.

1d) *Achse, Dimensionen einer Falte.* Als *Achse* einer Falte bezeichnet man eine in ihrem Scheitel oder Kern in der

Fig. 10. Sattelachse (s—s) und Muldenachse (m—m).



Streichrichtung gezogene, gedachte Linie (Fig. 10). Diese ist seltener horizontal, d. h. parallel zur Erdoberfläche oder auf ihre ganze Erstreckung eine Gerade ohne Ausweichungen nach oben, unten und nach den



Fig. 11. Welliger Verlauf einer Faltenachse (Ueberfaltung). Punktiert: Faltenachse; volle Linie: heutiges Relief. Massiv der Grandes Rousses. Nach Termier.

Seiten. Meist zeigt die Achse einen *welligen Verlauf, steigt an und ab* (Fig. 11) und bildet seitliche Abbiegungen („*Beugungen im Streichen*"). Man unterscheidet *Sattelachse* (oder -linie) und *Muldenachse* (oder -linie). Eine Wölbung der Achse bezeichnet man als *Achsenhebung* oder als *Ansteigen einer Falte*, eine Muldung als *Achsensenkung* (*Absinken einer Falte* [*im Streichen*]). Sind solche Hebungen und Senkungen stark ausgebildet, so erscheint die Falte quergefaltet. Eine *Querfaltung* kann, aber muß nicht das Ergebnis einer zeitlich verschiedenen Faltung sein. Unter der *Ueberhebung* der Achse versteht man eine schroffe und sehr bedeutende Hebung einer solchen.

Unter der *Länge* eines Sattels (für Mulden gilt das Folgende entsprechend) versteht man die Horizontalprojektion seiner Achse. Seine *Basisbreite* (Fig. 11 bb′) ist gleich der Horizontalprojektion einer im Querprofil gezogenen Verbindungslinie

zwischen den tiefsten Punkten einer bestimmten Schichtfläche in den beiden benachbarten Mulden. Die **Totalbreite**

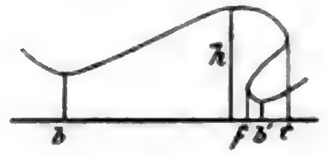


Fig. 12. Dimensionen einer Falte. h Lot, b' Höhe, bb' Basis-, bt Total-, ft Ueberfaltungsbreite.

(Fig. 11, bt) ist gleich der Horizontalprojektion des ganzen Gewölbes.

Bei geraden und schiefen Sätteln sind Basis- und Totalbreite gleich, bei überliegenden und liegenden Falte ist diese größer als jene.

Die **Ueberfaltungsbreite** (Fig. 11, ft) ist gleich der Horizontalprojektion des verkehrten Mittelschenkels. Die **abgewickelte Breite** ist gleich der Breite des ausgeglättet gedachten Schichtkomplexes. Die **Höhe** ist gleich dem Abstand des höchsten Punktes der Umbiegung von einer Horizontalen, die durch den tiefsten stratigraphisch gleichwertigen Punkt der tieferen Nachbarmulde gezogen ist. Der **absolute Zusammenschub** ist die Differenz zwischen der abgewickelten und der Basisbreite, der **relative Zusammenschub** ist gleich dem Quotienten von Basisbreite = 1 durch abgewickelte Breite.

1e) **Faltenzüge.** Die meisten Falten haben im Streichen eine größere Ausdehnung als in der Breite. Eine in der Längsrichtung ausgedehnte Falte nennt man einen **Faltenzug**, ein Stück eines Faltenzuges zwischen zwei Querschnitten einen **Falten(Sattel-, Mulden-)abschnitt.**

Brachyantiklinalen und **Brachysynklinalen** sind Falten von sehr geringer Ausdehnung im Streichen. Sättel, die im Streichen und quer dazu ungefähr gleiche Dimensionen besitzen, heißen **Dome**, entsprechende Mulden **Schüsseln.**

Ein Faltenzug findet im Streichen sein **natürliches Ende** (**Faltenschluß**; Gegensatz: **gewaltsames** Ende durch Verwerfung, Erosion usw.) durch die Abnahme der Neigung der Schenkel, also Größerwerden des Winkels zwischen denselben, meist unter Senkung resp. Hebung der Achse. Ein Sattel **verflacht sich** (**flacht sich aus**), eine Mulde **verflacht sich** (**hebt sich heraus**). An einem Faltenschluß herrscht **umlaufendes Streichen**, d. h. das Streichen ändert an jedem Punkte der Streichlinie seine Richtung in demselben Sinne. Ebenso ist das Fallen von Punkt zu Punkt verschieden. Bei einem **Sattelschluß** ist es **periklinal.** Das Umbiegen der Schenkel am Faltenschluß und ihre Verschmelzung miteinander bezeichnet man als **Sattel-** und **Muldenwendung.**

1f) **Zusammengesetzte Falten.** Sind beide oder ein Schenkel oder die Umbiegung einer Falte **in sich gefaltet**, so bezeichnet man die Falte als **gefaltet** oder **zusammengesetzt** (Fig. 5). Im Gegensatz zu den **Hauptfalten** (**-sätteln, -mulden**) nennt man die dadurch entstehenden sekundären Falten **Spezialfalten** (**-sättel, -mulden**). Ausdrücke wie „**Hauptmuldenflügel**" u. a. verstehen sich von selbst.

Hierher gehört die schon erwähnte Fächerfalte, bei der eine Faltung beider Schenkel in Form muldenförmiger Einbiegungen auftritt. Durch einmalige Faltung von Umbiegungen entstehen **Doppelgewölbe** und **-mulden.** Spezialfalten können sich im Streichen verflachen, **sich ersetzen** und **vertreten**, ebenso wie Hauptfalten (Fig. 13). Auch bei liegenden und Deckfalten sind Spezialfalten häufig (Fig. 14, 16). Bei gefalteten Falten kommt es oft zur Bildung von Tauchfalten.

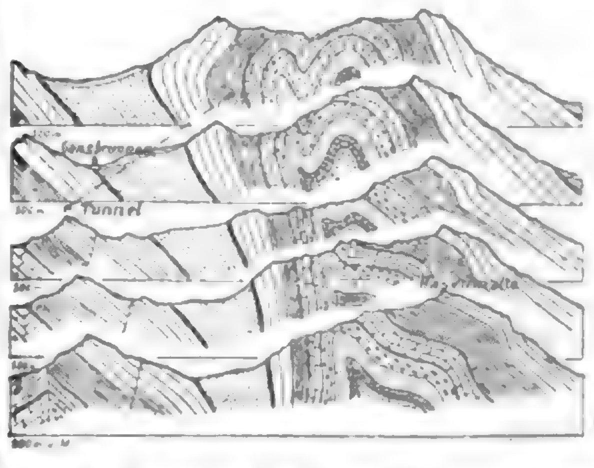


Fig. 13. Vertretung der Spezialfalte eines Schenkel einer überkippten Falte im Streichen durch eine Spezialfalte im anderen Schenkel. Im mittleren Profil hat die Falte den Charakter eines Doppelgewölbes. In den drei untersten Profilen links eine Verwerfung. Weißenstein, Schweizer Jura. Nach Buxtorf.

Wenn beide Schenkel einer Falte nach der gleichen Seite gewölbt oder gemuldet sind, so entsteht eine **gekrümmte Falte.** Solche gibt es namentlich unter den liegenden Falten (Fig. 14, 16). Die liegende Falte bildet dann als Ganzes eine Mulde oder ein Gewölbe (**Faltenmuldung, -wölbung**). Liegende und Deckfalten zeigen oft eine **Aufbiegung** (oder **Aufbäumen**) der **(Falten-)Stirn**, oder die Stirn taucht abwärts (Fig. 16). Ein Deckfaltensattel mit tauchender Stirn dürfte seine Krümmung meist durch einen zweiten Faltungsvorgang erhalten haben.

Eine an ihrer Umbiegung durch Falten von entgegengesetzter Richtung (also ein Sattel durch Mulden, eine Mulde durch Sättel) komplizierte Falte wird **geteilt** (Fig. 5) oder **zerteilt**, bei hochgradiger Zerteilung,

namentlich bei scharfen Umbiegungen der Spezialfalten zerschlitzt genannt (Fig. 14). Spezialfalten von bedeutenden Dimensionen in Deckfalten nennt man Verzweigungen. Zwischen solchen und selbständigen Falten gibt es alle möglichen Uebergänge.

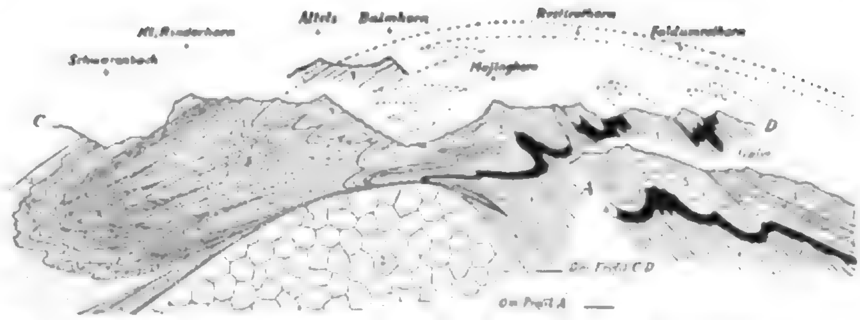


Fig. 14. Ueberfaltungsdecke mit Habitus einer Deckfalte. Das tauchende Antiklinalscharnier ist in den älteren Schichten tief zerschlitzt. Die Spezialfalten von 8 haben die Form von Keilen. In den älteren Gesteinen (rechts) aufrechte Spezialfalten. Schleppung am ausgewalzten Mittelschenkel. Das Joch ist tief erodiert. Profil durch das Westende des Aarmassivs: 1. kristalline Schiefer, 2 Gasterngranit, 3. Perm., 4 Trias, 5 bis 8 Jura, 9 bis 11 untere Kreide, 12 Eocän. Nach Lugeon und Buxtorf.

1g) Verbindung mehrerer Falten. α) Faltenbündel. In der Natur tritt selten eine Falte allein, sondern meist treten mehrere zusammen auf, die mit mehr oder weniger gleichem Streichen nebeneinander hinlaufen und schon dadurch in engster Verbindung stehen, daß immer je ein Schenkel zwei benachbarten Falten (Sattel und Mulde) gemeinsam ist. Die Gesamtheit solcher Falten nennt man Faltenbündel, -büschel, -system (Fig. 5, 6, 33). Die Falten liegen darin entweder mit ihren Flanken dicht gedrängt aneinander (Fig. 8) oder die Sättel sind durch offene Mulden voneinander getrennt (Fig. 33). Zu einer im Streichen verlaufenden Medianlinie kann ein Faltenbündel annähernd symmetrisch oder aber unsymmetrisch sein. Innerhalb eines Bündels hören Falten durch freie Endigung oder durch Verschmelzung mit anderen auf. Der Zusammentritt und die Verschmelzung zweier Faltenzüge kann unter weiten oder engen spitzen Winkeln erfolgen.

Unter der Achse eines Faltenbündels versteht man die Linie seiner allgemeinen Längserstreckung oder seines Generalstreichens. Auch bei einem Bündel kann die Achse statt parallel zur Erdoberfläche wellenförmig verlaufen, indem eine gemeinsame Hebung und Senkung der Faltenachsen auftritt, so daß in dem Faltenbündel Auffaltungsfelder oder Hebungsregionen und Einfaltungsfelder oder Senkungsregionen entstehen. Auch seitliche Beugungen oder Ablenkungen kommen vor, darunter sigmoide, d. h. S-förmige.

Ein zusammengesetzter (Falten-) Fächer oder Antiklinorium ist ein Faltenbündel mit derartiger Anordnung der Falten, daß die Achsen der mittleren in höherem Niveau verlaufen als die der seitlichen (Fig. 15). Liegt die Achse der zentralen Falte am tiefsten, die der seitlichen jeweils immer höher, so ergibt sich eine zusammengesetzte Fächermulde (Synklinorium).

Sind die Falten eines gewöhnlichen Faltenbündels, z. T. gerade, z. T. nach der einen, z. T. nach der entgegengesetzten Richtung geneigt, so spricht man von zögernden Falten.

Ein besonderes Bild bietet ein Isoklinalfaltensystem. Eine solche Isoklinalregion

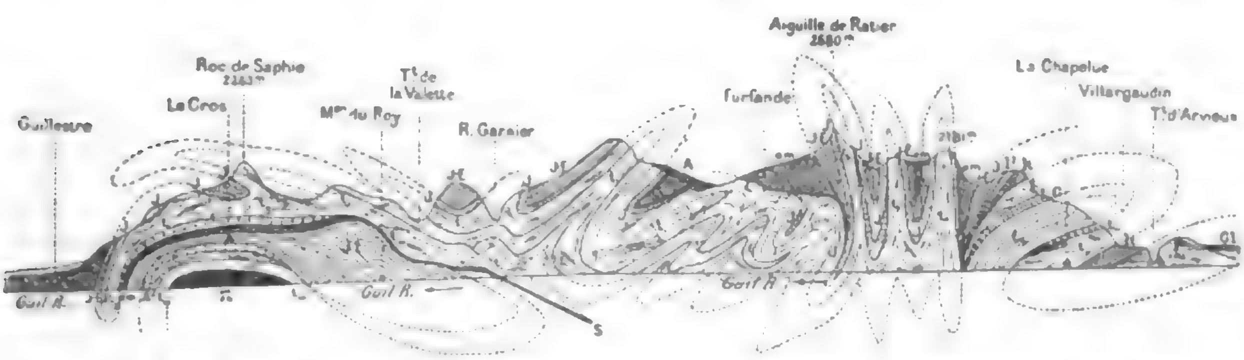


Fig. 15. Nach links (WSW) übergeschobener zusammengesetzter Faltenfächer mit Rückfaltung (nach rechts = ONO). Links ein Paket von Deckfalten mit tauchenden Antiklinalscharnieren. In der Mitte überkippte Falten. Die erodierten Falten durch Luftsättel ergänzt. Bei „Mon du Roy" ein linsenförmiger Rest des verquetschten Mittelschenkels (t,,, punktiert). Querprofil durch das Briançonnais von Mont Dauphin nach Château Queyras, französische Alpen; Guil R. = Lauf des Guilflusses. Nach W. Kilian.

(Fig. 8) zeigt eine Wiederholung der gleichen Schichtfolge abwechselnd normal und verkehrt. Außer einem Generalstreichen gibt es hier auch ein Generalfallen.

In einer Isoklinalregion mit saigerem Schichtfallen kommt oft eine Ueberneigung der Schenkel nach der einen oder anderen Seite vor. Bei den durch Ueberhebung der Achse zutage tretenden, isoklinal gebauten Massiven altkristalliner Gesteine ist diese Neigung am Rande oft nach außen gerichtet. Diese stets nur lokale Erscheinung hat Veranlassung zu der Vorstellung der „Fächermassive" gegeben.

Ein Bündel liegender Falten bezeichnet man wohl als Faltenpaket. In einem Paket aus Deckfalten pflegt jede höhere über die nächst tiefere hinwegzugreifen. Diese Falten werden „eskaladierend" genannt; sie überklettern sich (Fig. 16). Zickzackfalten sind übereinandergehäufte liegende Falten mit scharfen Scharnieren. Solche mit weniger scharfen Umbiegungen werden Kaskadenfalten genannt.

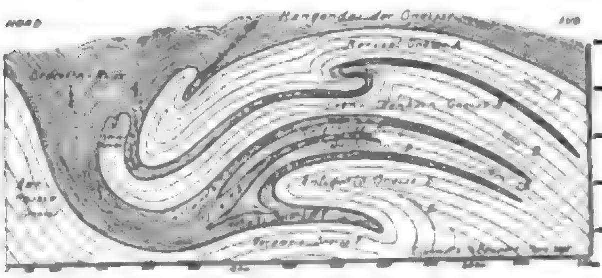


Fig. 16. Paket (Häufung) von eskaladierenden Deckfalten. Von unten nach oben: liegende Falte, verzweigter Tauchsattel, gekrümmte Deckfalte, Tauchdeckfalte mit Aufbäumung und geteilter Stirn, desgl. mit Rückstülpungen. Schema der Simplonfalten vor der Erosion. Nach Schmidt und Preiswerk.

Die Achse eines Pakets von liegenden oder Deckfalten kann horizontal verlaufen oder aber im Streichen absinken und ansteigen. Im Streichen kann eine Deckfalte durch Verflachung oder durch Verschmelzung mit einer anderen endigen. Auch kann die eine durch eine andere ersetzt werden.

Eine gekrümmte, tauchende Deckfalte, die im Streichen absinkt, zeigt einen von dem der aufrechten Falten sehr abweichenden Habitus. Man muß bei ihr unterscheiden zwischen (a) der eigentlichen Faltung, (b) der Krümmung der gesamten Falte und (c) dem Absinken im Streichen (b und c können, aber müssen nicht das Produkt einer der ursprünglichen Faltenbildung folgenden Dislokationsperiode sein, da gleichzeitige Entstehung mit a auch möglich ist). Mißt man an einer solchen Falte irgendwo das Fallen der Schichten, so erhält man am einzelnen Orte nur das Mittel aus diesen drei Richtungen, also einen lokalen Wert, der für die Beurteilung der Gesamtform der Falte und für die Bestimmung der Richtung des Gebirgsdruckes wertlos ist. Für die Erkenntnis des Gebirgsbaus muß neben der Lokaltektonik auch die Regionaltektonik überblickt werden.

In einem Deckfaltenpaket sind manchmal die älteren Schichten stärker gefaltet

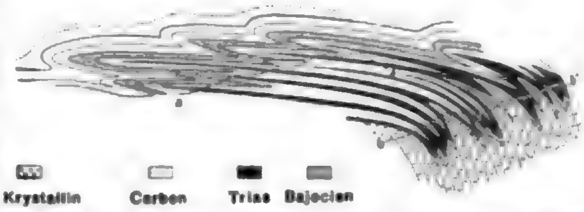


Fig. 17. Deckfaltenpaket. Stärkere Faltung der älteren Schichten, Vortreibung der jüngeren. Steile Schichtstellung in der Wurzelregion. a—a, und b—b, heutiges Relief. Mt. Joly, Hochsavoyen. Nach Bertrand und Ritter.

als die jüngeren und dazu letztere stark nach vorn gepreßt. In solchen Profilen (Fig. 17) dokumentiert sich die Faltung als ein gegen die Erdoberfläche bis ausklingendes Phänomen der Tiefe.

β) Schuppenstruktur. Treten in den Falten einer Isoklinalregion Faltenüberschiebungen auf, so entsteht durch Wegfall der verkehrten Schenkel eine Wiederholung mehrerer, durch die an ihrer Basis liegenden (Falten-)Ueberschiebungsflächen getrennter Schichtfolgen. Diese Anordnung

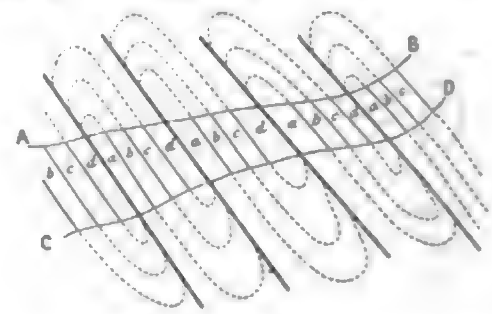


Fig. 18. Schematisches Profil einer Isoklinalregion mit Schuppenstruktur. Dicke schwarze Linien: Ueberschiebungsflächen. a älteste, d jüngste Schicht. Die beiden Querlinien begrenzen den in der Natur meist allein sichtbaren Teil des Profils. Nach Haug.

heißt Schuppenstruktur (Fig. 18), der zu ihr führende Vorgang Schuppung, der Schichtenkomplex geschuppt. Eine Schuppe ist ein einzelner Schenkel aus einer Folge isoklinaler, von Faltenüberschiebungen durchsetzter Falten, ein Schuppenpaket eine zusammengehörige Anzahl von solchen.

Bei der Schuppenbildung geht sehr oft nicht nur der verkehrte, sondern es gehen auch Teile der normalen Schenkel verloren, so daß in geschuppten Komplexen infolge von ausgedehnten Reduktionen, Ver- und Ausquetschungen in den stratigraphischen und

tektonischen Einheiten auch Schuppen aus wenigen, ev. reduzierten, stratigraphischen Einheiten vorkommen. Für stark reduzierte Schuppen ist der Name Schichtpaket oder Fetzen üblich.

1h) Konkordante und diskordante Faltung. Nehmen bei der Faltung die übereinander lagernden Schichten die gleichen Biegungen an, so ist die Faltung konkordant oder harmonisch. Ist das nicht der Fall, wie es bei der Faltung sehr un-

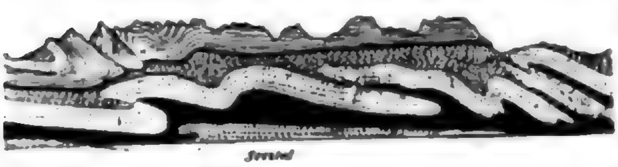


Fig. 19. Diskordante Faltung. Die Faltung erlischt in weichen tonigen Gesteinen. Links trifft ein Sattel von unten gegen eine Mulde oben. Alviergruppe, Seeztalseite: n Neokom, b Valendismergel, i Malm; darunter Dogger und Lias. Nach Arn. Heim.

gleichartiger Gesteine vorkommt, so bildet sich eine diskordante oder disharmonische Faltung aus (Fig. 19). Bei dieser werden die einen Schichten des gleichen Komplexes zu anders gestalteten Falten zusammengestaut als die anderen, so daß die Schichtflächen (auch ohne primäres Auskeilen oder Verjüngungen von Schichten) nicht überall die gleiche Entfernung voneinander bewahren. Oft erscheinen die tieferen Schichten stärker gefaltet als die höheren (Fig. 17). In weichen, schiefrig-tonigen oder mergeligen Gesteinen wird die Faltung manchmal vollständig ausgelöscht (erstickt), indem diese selbst sehr stark, höhere harte Gesteine aber wenig oder gar nicht gefaltet werden (Fig. 19). Ferner können harte Bänke in weichen Gesteinen von einer diese letzteren betreffenden Faltung verschont bleiben.

1i) Fältelung. Die bisher betrachtete Faltung im großen findet ihr Seitenstück in der Fältelung der Gesteine, der Faltung im kleinen. Bei dieser findet man die verschiedenen Formen der Faltung und Stauchung wieder. Feinste Fältchen heißen Runzeln; die Schichten erscheinen gelegentlich gekräuselt. Unter galoppierender Fältelung versteht man das Auftreten von Fältchen, die flach gegen die ansteigende Schichtfläche übergeneigt sind, also auf dieser ansteigen.

2. Ueberschiebungsdecken. 2a) Ihre Teile. Unter einer Ueberschiebungsdecke versteht man den hangenden Schenkel einer Deckfalte von weitem Ausmaß, deren Mittelschenkel stark reduziert oder ganz ausgefallen ist (Fig. 20). Ihre ältesten Gesteine ruhen auf den jüngeren Gesteinen der Unterlage. Unten, an ihrer Basis wird die Ueberschiebungsdecke durch eine Ueberschiebungsfläche begrenzt. Dies ist die Fläche, auf der sich die Ueberschiebungsbewegung vollzogen hat. Der Schnitt einer solchen Fläche mit der Erdoberfläche ergibt eine Ueberschiebungslinie. Eine Ueberschiebungsdecke ist eine tektonische Einheit, die eine größere tangentiale (horizontale, leicht ab- oder aufwärts gerichtete) Bewegung erfahren hat. Ueberschiebungsflächen können auch starke Neigung besitzen, namentlich nahe der Wurzelregion oder infolge sekundärer Faltung. Die Länge des Weges (der Schubbahn), den die Gesteine einer Ueberschiebungsdecke von ihrem ursprünglichen Bildungsraum bis in ihren durch die Ueberschiebung erreichten Lagerungsraum zurückgelegt haben, nennt man das Ausmaß der Ueberschiebung (oder die Förderlänge). Es kann hunderte von Kilometern erreichen, doch pflegt die Ausdehnung einer Ueberschiebungsdecke im Streichen das Ausmaß ihrer Bewegung stark zu übertreffen. Ueberschiebungsdecken mit großer Förderlänge nennt man Fernüberschiebungen, solche mit kleiner Nahüberschiebungen. Zwischen beiden gibt es keine scharfe Grenze.

Die meisten Ueberschiebungsdecken gehen aus liegenden Falten hervor (Entstehung ohne vorhergehende Faltenbildung s. S. 893). Zwischen Deckfalten und Ueberschiebungsdecken gibt es keine scharfe

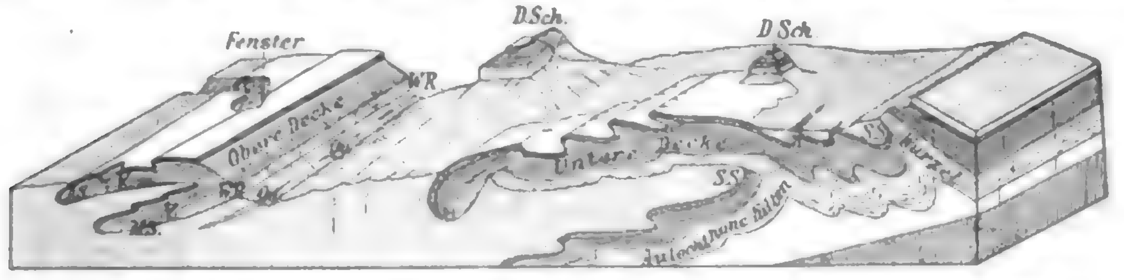


Fig. 20. Perspektivische Ansicht zweier übereinanderlagernder Decken (untere und obere). AS Antiklinal-, SS Synklinalscharnier, MS Mittelschenkelreste, V Deckenverzweigungen, Qu Quetschschlinge, WR Wurzelrand, D.Sch Deckschollen. Unterschied zwischen autochthon und schwimmend. Wurzeln mit steiler, Decken mit flacher Schichtlage. Nach Lugeon.

Grenze. Haben letztere nicht hochgradig reduzierte Mittelschenkel, so kann man sie als Faltendecken bezeichnen.

Man könnte, um genau zu sein, die aus liegenden Falten hervorgegangenen Ueberschiebungsdecken stets Ueberfaltungsdecken nennen und erstere Bezeichnung für die auf andere Weise entstandenen reservieren. Doch hat sich der Name Ueberschiebungsdecke bereits für alle ohne Rücksicht auf die Entstehung unausrottbar eingebürgert.

Für Ueberschiebungsdecke sagt man auch kurz Decke oder Schubdecke, ferner Schub-, Ueberschiebungsmasse (letztere Ausdrücke werden meist für einen Komplex mehrerer Decken übereinander gebraucht, s. S. 891). Die Ausgangsstelle einer Decke heißt Wurzel. Diese ist ein Komplex sattelförmig gestellter Schichten, doch nennt man auch wohl die untere Nachbarsynklinale Wurzel (vgl. S. 880). Der vordere Teil einer Decke heißt Stirn, die Richtung von der Wurzel gegen die Stirn heißt vorwärts, die umgekehrte rückwärts. Eine Decke „dringt vor", sie ist „vorgestoßen".

Eine Tiefbohrung an der Wurzel würde immer ältere Gesteine durchsinken, in der Region der Decke aber nach Durchfahrung dieser und der Schubfläche in die jüngsten Schichten der Unterlage stoßen. Diese kann entweder wieder eine Decke oder aber autochthones Gestein sein.

Autochthon ist Gestein, das sich noch genau oder annähernd innerhalb seines ursprünglichen Bildungsraumes befindet. Solche Gesteine „wurzeln". In der Decke selbst liegen die Gesteine wurzellos (sind allochthon). Die Decke schwimmt auf ihrer Unterlage. Besonders auffallend ist die Wurzellosigkeit von Eruptivgesteinen.

Unrichtig ist der Gebrauch von „Decke" für die Gesamtheit der jüngeren Schichtgesteine, die autochthon ältere kristalline Gesteine überlagern. Man sollte da stets von „Sedimenthülle" sprechen.

Das Antiklinalscharnier einer Decke nennt man Stirngewölbe (-falte), das Synklinalscharnier wohl auch Wurzelscharnier, Kern ihre ältesten Gesteine. Viele besitzen eine Basis aus kristallinen Gesteinen. Decken mit aufgerichteter Stirn heißen Brandungs-, mit abwärts gerichteter Tauchdecken.

In den Deckenbau treten kristalline ebenso und mit der gleichen Passivität ein wie Schichtgesteine. Aehnlich wie bei Deckfalten sind in den Decken die jüngeren Formationen meist stark nach vorn getrieben, während sich in den Wurzeln nur die älteren Schicht- und die altkristallinen Gesteine finden. An der Basis einer Decke spitzen sich die älteren Gesteine oft nach vorne zu aus (Fig. 29). Die in der Wurzelregion noch vorhandenen Reste jüngerer Gesteine hat man auch wohl als Wurzeln der weiter vorgestoßenen Teile derselben bezeichnet.

Steile Stellung der Schichten ist in der Wurzelregion von Decken so allgemein verbreitet, daß sie geradezu als charakteristisches Merkmal für eine solche gelten kann. Zonen, in denen die Wurzeln mehrerer Decken hintereinanderliegen, nennt man Wurzelland, die Regionen dagegen, wo die Decken sich flach ausbreiten, Deckenland. Für letzteres ist häufig die Horizontalität oder die leichte Faltung der Schichten, stets die Wiederholung von Schichtfolgen übereinander und die Auflagerung älterer Gesteine oben auf jüngere charakteristisch.

In der Regel greift jede höhere Decke weiter nach vorn als die nächst tiefere, doch gibt es hiervon Ausnahmen.

Manche Forscher nehmen für alle oder einen Teil der Decken Entstehung durch Abgleiten an. Eine solche Decke kann als Abgleitungs- oder Gleitdecke bezeichnet werden. Ihre Entstehung verlangt eine starke Heraushebung des Ursprungsgebietes gegenüber einer Vortiefe und eine abschüssige Schubbahn.

2b) Gefaltete Decken und Deckenverzweigung. Eine Decke liegt nicht immer flach, sondern kann in sich gekrümmt

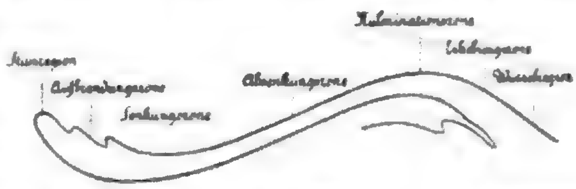


Fig. 21. Zonen einer gewölbten Ueberfaltungsdecke. Nach Arn. Heim.

oder gefaltet sein. Bei einer einmal gewölbe- und muldenförmig gebogenen Decke kann man unterscheiden (Fig. 21): Wurzelregion, Erhebungszone (mit ansteigender Sohle), Kulminations-, Absenkungszone (mit fallender Sohle) oder Ausbreitungsregion, Senkungs-, Aufbrandungszone und Stirnregion. In der Kulminationszone erreicht die Decke ihre Kulminationshöhe oder ihr Joch (vgl. Fig. 14). Von diesem dacht sie sich vor- und rückwärts ab. Diese verschiedenen Regionen lassen sich auch oft bei Deckfalten unterscheiden.

Verzweigt sich eine Decke in ihrer Absenkungszone oder in ihrer Stirnregion, so entstehen Deckenverzweigungen oder Zweigdecken, die man im Gegensatz zu der Stammdecke auch wohl Tochterdecken nennt.

Als Teildecke bezeichnet man eine tektonisch zwar selbständige, in ihren Dimensionen aber unbedeutendere, auch wohl reduzierte Decke, oder eine Zweigdecke.

Der Faltenwurf, den manche Decken aufweisen, kann in einer zweiten Faltungsphase oder infolge eines vor der Stirn gelegenen Hindernisses durch Stauung ent-

standen sein. Eine Decke kann das Bild einer Region mit einfacher Faltung vortäuschen (Fig. 20, untere Decke). Bildet eine Decke mehrere Mulden, so erscheint die innerste, die Wurzelmulde, als Deckenschwanz. Hat eine Decke bei ihrem Vordringen an ihrer Stirn ein Hindernis zu über-

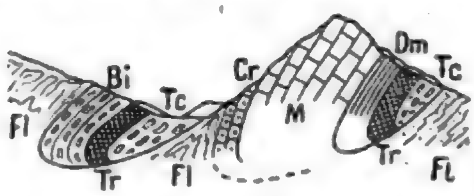


Fig. 22. Zwei Drehfalten, die schräg von oben rechts in die Pfannen der tertiären Unterlage (Fl) hineintauchen. Ihre jüngsten Schichten (A und Bi) liegen am weitesten nach vorn (links). Die Decke, von der sich die Tauchfalten abzweigen, ist der Erosion zum Opfer gefallen. NW—SO-Profil durch den Mutterkopf, mittlere Voralpen: Tc, Tr, Trias, Bi Liasbreccie, Dm Dogger, M Malm, Cr obere Kreide, Fl Tertiärflysch. Nach Fr. Jaccard.

winden, so kann es dadurch zur Entstehung einer abwärtsgerichteten Drehfalte (Fig. 22) kommen, daß die Bewegung der Decke an der Sohle stockt, ihre höheren Teile sich aber weiter bewegen. Dieser Vorgang kann sich erneuern, so daß mehrere Drehfalten sich überholen. Eine Drehfalte liegt in einer Pfanne des Untergrundes.

2c) Verbindung mehrerer Decken. Deckenpaket oder -häufung ist die Bezeichnung für einen Komplex mehrerer übereinanderliegender Decken. Mehrere benachbarte Decken, die gewisse (namentlich stratigraphische) gemeinsame Merkmale aufweisen, faßt man als Deckensystem oder als „Decke höherer Ordnung" zusammen.

Wie bei Faltenbündeln und Deckfaltenpaketen können in Deckenhäufungen einzelne Decken endigen, auch durch andere tektonisch ersetzt werden. Quergerichtete Aufwölbungen und Muldungen (Querfaltung) bewirken Absinken und Ansteigen der Deckenhäufung im Streichen, also die Entstehung von Ein- und Auffaltungsfeldern in ihr. Eine Deckenhäufung kann als Ganzes gefaltet sein und aufrechte oder liegende Falten bilden, als wären die Decken einzelne Schichten. Hierbei ergibt sich natürlich eine Ineinanderschachtelung der Scharniere. Rückstülpungen einer Decke werden von der höheren kapuzenförmig umhüllt.

2d) Verdrückung und Ausquetschung, Zerrung und Zerreißung. α) Untergrund. Eine Decke erzeugt vermöge des Druckes, den sie bei ihrer Bewegung ausübt, im Untergrunde Falten, die nach derjenigen Richtung übergeneigt sind, in der sich die Decke bewegt („Bewegungszug"). Wegen ihrer Form sind solche Falten wohl Flammen genannt worden. Der Untergrund kann ferner abgeschliffen, poliert, mit Schrammen und Kritzen versehen werden.

β) Mittelschenkel. Der Mittelschenkel wird verdrückt, verdünnt, ausgequetscht, ausgewalzt usw. (vgl. S. 881) und bis zum Verschwinden reduziert. Diese Ausquetschungserscheinungen bestehen entweder in einer Zertrümmerung der Gesteine, so daß unter der Sohle der Decke eine Reibungs(Dislokations-)breccie liegt, oder in einer Verknetung der Gesteine miteinander, so daß sie einen hochgradig gequälten Habitus erlangen. Alle solchen Zertrümmerungsprodukte an einer Ueberschiebung bezeichnet man als Mylonit. Oft haben die verquetschten Gesteine Linsenform angenommen.

γ) Basis. Auch die Basis der Decken ist oft mylonitisiert. Häufig konstatiert man ein Verschleifen der Basis. Die altkristallinen Gesteine an der Basis einer Decke sind, wenn überhaupt vorhanden, oft in einem brecciösen oder verkneteten Zustand.

δ) Stirn. Der Vorderrand einer Decke breitet sich konvex aus, es entsteht ein Ueberschiebungsbogen. Damit ist eine Ausdehnung verbunden. Diese bewirkt eine Längszerrung, die sich oft bis zu einer Längszerreißung steigert. Die eine und andere entspricht der Differenz des Bogens und der Sehne. Infolge der Streckung weisen die vorderen seitlichen Endigungen der Decken dann hochgradige Ausdünnungen, Schichtenunterdrückungen usw. auf. Durch die Längszerreißung kann der Stirnrand in einzelne Stücke, Fetzen zerlegt werden („tektonische Moräne"). Auf die Weise können Klippen (= Deckschollen) entstehen (vgl. S. 891). Ein solcher zerrissener Stirnrand kann auch von unten her unter einer höheren Decke hervortreten. Findet eine Decke nicht durch Aufhören ihrer Bewegung ein freies Ende, sondern wird ihrem weiteren Vordringen durch ein vorliegendes Hindernis ein Halt aufgezwungen, während die Bewegung in ihr noch nicht zur Ruhe gekommen ist, so entsteht eine Deckenbrandung (vgl. Fig. 21). Ist dieselbe sehr heftig, so können sich Ueberwurfsklippen dadurch bilden, daß die Ueberschiebungsfläche senkrecht gestellt wird und die Decke zerschellt, so daß die Brandungswelle sich überstürzt und zersplittert. Eine Ueberwurfsklippe zeigt entgegengesetzte Lagerung wie eine Deckfalte, indem bei ihr an der Außenseite das älteste Glied liegt.

ε) Decke. Wenn eine Decke sich unterhalb einer anderen bildet und dann keil-

förmig in die höhere eindringt, so entstehen in dieser mannigfaltige Lagerungs-

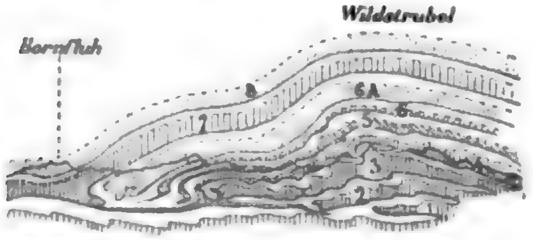


Fig. 23. Profil durch eine Deckenhäufung. Die tieferen Decken sind gefaltet und zeigen Einschachtelung der Scharniere, die höheren besitzen ein Joch und tauchende Stirn. Decke 3 dringt in 4 ein, infolge wovon sich eine Schuppe von 4 tief unter 3 hinzieht. Schematisches NW.—SO.-Profil durch die Decken der Kalkhochalpen (1—3) und Voralpen (4—8). Unten: autochthone Unterlage, 1 Deckfalte der Dt. de Morcles, 2 Diablerets-, 3 Wildhorndecke, 4 bis 6 Decken der „inneren Zone", 6 A Niesendecke, 7 Klippendecke (Decken der mittleren Voralpen), 8 Brecciendecke. — Die heller gehaltenen Teile des Profils sind der Erosion zum Opfer gefallen. Das Weiße zwischen den Decken dient nur zur Erleichterung des Ueberblicks. Die Mächtigkeit der Deckenhäufung ist dadurch übertrieben. Nach Lugeon.

störungen. So kann z. B. von der tieferen Decke eine mehr oder weniger ausgedehnte Schuppe der höheren überwältigt werden (Fig. 23).

Geht eine Decke von großer Mächtigkeit über eine weniger mächtige und wegen ihrer Gesteinsbeschaffenheit weniger widerstandsfähige Decke hin, so kann eine Verquetschung oder Zertrümmerung dieser durch jene eintreten, wobei die tiefere womöglich in eine gigantische Reibungsbreccie verwandelt oder in gesetzloser Weise in unregelmäßige Schuppenpakete aufgelöst werden kann (vgl. Fig. 30). Man nennt diesen Vorgang Deckenverquetschung. Solche sind stets ein Anzeichen für den stattgefundenen „Kampf um den Raum". Die Decke kann stellenweise ganz ausgequetscht sein (Unterdrückung einer Decke), oder es können wenigstens einzelne ihrer stratigraphischen Glieder verloren gehen („tektonische Lücke"). Decken mit tektonischen Lücken sind laminiert. Solche tektonischen Lücken können auch in der verquetschenden Decke auftreten. Eine Decke, die eine verquetschende Wirkung in großem Maßstabe ausgeübt hat, heißt Verdrückungsschlitten.

Der Zusammenhang einer Decke mit ihrer Wurzel kann durch Verquetschung des Verbindungsstückes unterbrochen werden (bei Gleitdecken auch durch Abreißen). Spärliche Reste einer verquetschten Decke sind Quetschlinge oder Phakoiden genannt worden. Werden einzelne Stücke des Mittelschenkels oder der Basis von einer Ueberschiebungsdecke mitgeschleppt, so entstehen ab- oder mitgeschürfte Fetzen, Schubfetzen, Scherlinge oder, wenn klein, Schubsplitter, -spähne, Gesteinsspreu, exotische Blöcke.

Der Name „exotisch" bezieht sich auf die Fremdartigkeit solcher Blöcke in fazieller Hinsicht, z. B. kristalliner Blöcke inmitten von Schichtgesteinen oder sedimentärer Gesteine in einer von ihrer Unterlage abweichenden Facies. Die Fremdartigkeit tritt bei nachträglicher erosiver Zerstörung der Decke besonders auffallend hervor. Im Gegensatz zu den exotischen bezeichnet man als Ablagerungsblock einen Block, der kein Scherling, sondern innerhalb der Sedimente, in denen man ihn findet, abgelagert ist, einerlei, ob dies Sediment autochthon oder verfrachtet ist.

Die Stirn einer Decke kann durch eine höhere Decke abgequetscht und mitgeschleift (mitgeschoben) werden. Sie kann, unter der Stirn der höheren Decke hervortretend, eine frontale Kette oder, wenn longitudinal zerrissen, eine frontale Gliederkette bilden.

2e) Verstellung der Facies. Die Deckenbildung bedeutet einen sehr großen Zusammenschub in der Erdkruste, also eine Verkürzung des Erdumfanges und damit auch des Erdradius. Sie bedeutet ferner eine Verfrachtung von Gesteinen aus ihrem ursprünglichen Bildungs- in einen neuen Lagerungsraum. Da das Streichen der Decken in den Kettengebirgen im wesentlichen mit demjenigen dieser letzteren selbst übereinstimmt, so ist die Bewegungsrichtung des Deckenschubes im allgemeinen quer zum Streichen der Gebirge. Da die Faciesgebiete in den großen Kettengebirgen bei gleichem Streichen wie diese selbst und großer Längsausdehnung nur geringe Breite zu haben pflegen, so wird bei der Deckenbildung oft eine Decke aus der einen Facieszone in eine andere verfrachtet. In einer Serie übereinanderliegender Decken zeigt sich daher oft (aber nicht immer) in gleichaltrigen Formationen verschiedene Facies (und Mächtigkeit; Fig. 29). Innerhalb einer Decke herrscht dagegen oft gleiche Facies (fast scheint es, als ob die Faciesgrenzen den Dislokationen besonders bequeme Ansatzlinien böten). So ergibt sich aus der Ineinandertragung der Gesteine verschiedener Facieszonen eine Verstellung der Facies (Fig. 24), die für den Deckenbau so bezeichnend ist, daß sie geradezu als eins seiner wichtigsten Erkennungsmittel dient. Die höheren Decken erhalten oft den tieferen gegenüber vermöge ihrer abweichenden Facies einen exotischen Charakter. Uebereinstimmende Faciesmerkmale

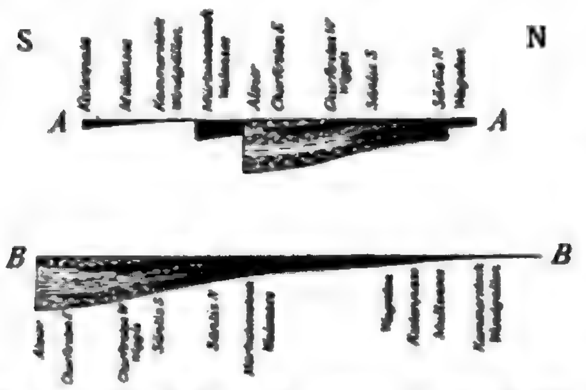


Fig. 24. Verstellung der Facies in der Kreideformation der östlichen Schweizer Alpen. Die Faciesverschiedenheiten sind durch verschiedene Signatur angedeutet. A A jetzige Nebeneinanderlagerung, mit abruptem Facies- und Mächtigkeitswechsel, B B Ursprüngliche Nebeneinanderlagerung nach Abwickelung der Decken, mit allmählicher Facies- und Mächtigkeitsänderung. N Nord, S Süd. Nach Arn. Heim.

gestatten die Zusammenfassung von Decken höherer Ordnung.

Eigenschaften, die die Gesteine bereits in ihrem Bildungsraum besaßen, nennt man oekogen.

Läßt sich der ursprüngliche Bildungsraum einer Decke nicht feststellen, so wird sie kryptotop genannt.

3. **Zweifache Faltung, diskordante Lagerung.** Ein gefalteter Schichtkomplex kann nach einer zeitlichen Pause von einer neuen Faltung ergriffen werden — wiederholte oder zweifache Faltung. War die erste Faltung eine bedeutende, gebirgserzeugende, so pflegt die zweite schwächer zu sein. So ist die Faltung, die den Faltenwurf in Decken hervorbringt, schwächer als diejenige, die zur Deckenbildung führte. Eine nach Ablauf einer längeren Periode der Erdgeschichte im Gebiete einer älteren einsetzende neue, schwächere Faltung, die die gleichen Richtungen wie jene einhält, wird posthum genannt.

Aus dem Vorhandensein von Querfaltungen in Faltenbündeln oder von Faltungen in Decken darf nicht ohne weiteres auf zweifache Faltung geschlossen werden, da es sich auch um primäre Bildungen handeln kann.

Sind die älteren Falten infolge der mit der Faltung verbundenen Hebung in den Bereich der Erosion und Denudation gekommen, dadurch abgetragen worden und nach Senkung und einer Transgression von einer neuen Schichtfolge überdeckt, so zeigt diese (im Gegensatz zu der gleichförmigen oder konkordanten Lagerung in allmählich und ohne Eintritt von Lagerungsstörungen abgesetzten Schichten) eine ungleichförmige oder diskordante Auflagerung auf die alten Falten: die Schichten stoßen gegeneinander ab (Fig. 26 oben).

Besteht die Dislokation des älteren Komplexes nicht in eigentlicher Faltung, sondern nur in schwacher Aufrichtung, so kann die Diskordanz des überlagernden Komplexes so gering sein, daß sie sich im einzelnen Aufschluß nur stratigraphisch, nicht tektonisch bemerkbar macht und nur beim Ueberblick über einen größeren Bezirk in ihrer wahren Natur erkannt werden kann. Konkordante Auflagerung eines Schichtkomplexes auf eine stratigraphische Diskontinuitätsfläche hat man Akkordanz, eine nur scheinbar konkordante Pänakkordanz genannt.

Bei der Faltung eines diskordanten Komplexes erreicht die Faltung des bereits früher gefalteten Teiles nicht notwendig den

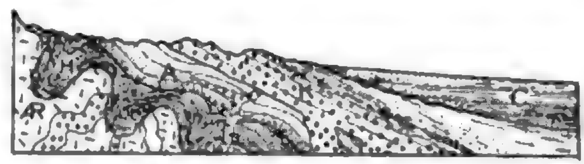


Fig. 25. Wiederholte Faltung. Profil durch fünf diskordant zueinander lagernde Schichtfolgen. Die vier unteren zeigen Faltung. Jede höhere Schichtfolge ist schwächer gefaltet als die nächste tiefere. Schematisches Profil durch Archäikum (AR), Proterozoicum (H, A, K) und Cambrium (C) in der Lake Superior-Gegend. Die Eruptiva sind mit Kreuzchen bezeichnet. Nach Chamberlin und Salisbury.

Betrag der Summe beider Faltungen; denn eine schon gefaltete Masse leistet der zweiten Faltung einen intensiveren Widerstand als die ungefalteten Schichten. Die Faltung der Schichten über der Diskontinuitätsfläche ist in der Regel anders und zwar schwächer als darunter (Fig. 25).

Durch zweifache Faltung kann eine zuerst nur aufgerichtete Schichtfolge zur Ueber-

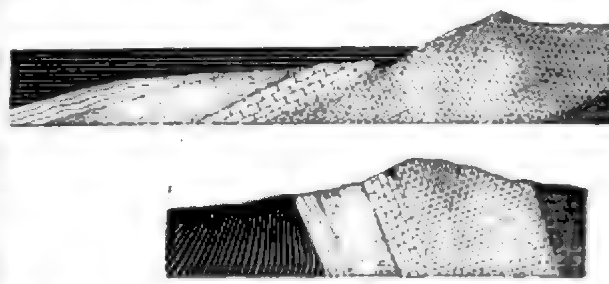


Fig. 26. Oben: Aufgerichtete Schichten, erodiert und diskordant von horizontalen Schichten überlagert. Unten: Ueberkippung des vorher aufgerichteten und dabei Aufrichtung des diskordant lagernden Komplexes mit nachfolgender Erosion. Profil durch den Langen Berg bei Harlingerode nördlich des Harzes; oben: zur Zeit des oberen Emscher, unten: im jetzigen Zustand. Untere Schichtserie = Dogger—Gault, obere: Emscher. Nach Schroeder.

kippung gebracht werden. In Fällen wie dem in Figur 26 dargestellten wird die zeitliche

Zerlegung des Ueberkippungsvorganges durch die Diskordanz in der Schichtfolge ermöglicht.

Werden Falten schief gefaltet, so tritt Torsion ein. Es entstehen windschiefe, gedrehte, Korkzieher- oder Torsionsfalten.

Daß mit den Ueberschiebungsdecken auch die Ueberschiebungsflächen gefaltet werden, versteht sich von selbst.

4. Erodierte Falten und Decken. Darstellung auf der geologischen Karte. 4a) Falten. Schichten werden durch Faltung gehoben; durch Faltung entstehen Gebirge. Da gefaltete Regionen Hervorragungen an der Erdoberfläche bilden, so werden sie durch die Kräfte der Verwitterung und Abtragung zerstört, so daß die Falten in der Natur meist in mannigfacher Weise an- und abgeschnitten erscheinen.

Die Zerstörung kann die Umbiegungen oder die Schenkel betreffen. Ein erodierter Sattel z. B. ist eine aufrechte Antiklinale, in deren Umbiegung ein Tal eingefurcht ist (Fig. 33 rechts). Ein abgetragener Sattel wird oben durch eine Fläche quer abgeschnitten (Fig. 8). Unter einer C-Falte versteht man eine kurze liegende Mulde, deren oberer Nachbarsattel seine Umbiegung durch Erosion verloren hat.

Ergänzt man in einer Profilzeichnung (Schnitt senkrecht zur Erdoberfläche) einen solchen verstümmelten Sattel mit einer punktierten, durch die Luft geführten Linie oder durch mehrere, die ursprüngliche d. h. vor der Zerstörung vorhandene Form der Schichten rekonstruierende Linien, so konstruiert man einen Luftsattel (Fig. 5, 8, 15).

Bei der Rekonstruktion liegender und tauchender Falten wird man unter Umständen auch eine „Luftmulde" zu zeichnen haben. Naturgemäß sind aber unter den Luftfalten die Luftsättel häufiger. Theoretische Ergänzungen von Mulden müssen meist unten durch die Erde gezogen werden (Fig. 15). Die natürlichen Profilaufschlüsse (Felsen, Berge, Talwände, Küsten) und die künstlichen (Bergwerke, Tunnel) enthüllen in erster Linie die mittleren Teile der Falten (Fig. 8, 15), während die Sattelbiegungen sehr oft durch die Erosion benagt sind oder in der Luft liegen, die Muldenbiegungen dagegen in der Tiefe der Erde verborgen sind.

Ein irgendwie gerichteter Schnitt einer Schicht mit der Erdoberfläche heißt Schichtenkopf. Schneidet die Erdoberfläche in irgendeiner Gestaltung einen aufrechten Faltenzug ab, so bildet sein Kern in der Mitte einen einheitlichen Streifen, während (bei einem Horizontalschnitt einer symmetrischen geraden Falte in gleicher Breite, sonst in verschiedener Breite) zu dessen Seiten die Schichtköpfe der Schenkel als Doppelstreifen hinlaufen. Wo eine Mulde sich heraushebt, eine Achse sich senkt, schließen sich diese Streifen um den endigenden Kernstreifen zusammen (Fig. 27). Mulden, die sich nach beiden Seiten im Streichen herausheben, und Sättel, die nach beiden Seiten absinken, zeigen einen ring- oder ellipsenförmigen Verlauf der Schichtköpfe.

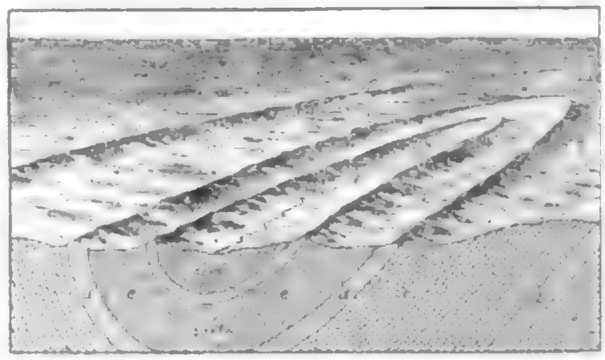
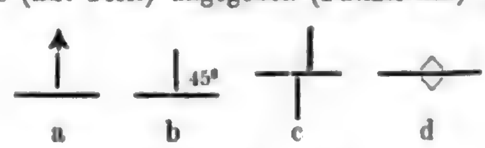


Fig. 27. Perspektivische Ansicht und Profil einer abgetragenen Mulde. a älteste, b—e jüngere Schichten. Nach Willis.

Unter Heraushebung einer Schicht oder Formation wird auch wohl ihre durch Erosion erfolgte Freilegung nach Hebung durch Faltung verstanden.

Die Schichten des Schenkels einer abgetragenen Falte von großer Breite erscheinen wegen der Schwierigkeit, die ganze Falte zu überblicken und weil man keine Umbiegung sieht, einfach als aufgerichtet. Einen Streifen aufgerichteter Schichten bezeichnet man als Aufrichtungszone, auch wohl, wenn der entgegengesetzte Schenkel weit entfernt ist, als Monoklinale, einen solchen von überkippten Schichten als Ueberkippungszone.

Von unverletzten Falten würde eine geologische Karte nur die oberste Schicht zur Darstellung bringen, also geradeso wie bei einer unverletzten Tafel nur eine Farbe zeigen. Aber derartige wohlerhaltene Falten gibt es in der Natur nie oder nur auf kleinem Raum. Abgetragene Falten erscheinen auf der geologischen Karte (d. h. in Horizontalprojektion) als Streifen. Die Lage geneigter Schichten wird auf den Karten durch eine in der Strichrichtung gezogene Linie und eine auf deren Mitte senkrecht dazu gestellte (die Fallrichtung angebende) Linie (mit Pfeil) angegeben (Fallzeichen). Den



Fallwinkel bezeichnet man durch verschiedene Länge des Fallstriches (langer Strich = kleiner Winkel) (a) oder man setzt die Gradzahl (b) daran. Für söhlige (c) und saigere (d) Lagerung gibt es besondere Zeichen.

4b) Decken. Auch die Ueberschiebungsdecken werden durch die Erosion zerschnitten und deshalb kann man nur selten eine Decke

von ihrer Wurzel bis zu ihrer Stirn im Zusammenhang verfolgen.

Von manchen Forschern wird die Unterbrechung des Zusammenhanges zwischen Wurzel und vorderen Teilen nicht auf Erosionswirkung, sondern auf Abreißen der Decke beim Abgleiten zurückgeführt.

Die Trennung der Decken von ihrer Wurzel erschwert oft die Feststellung der Lage der Wurzeln einer bestimmten Decke. Die Schwierigkeit wird erhöht durch das häufige Fehlen der leicht kenntlichen jüngeren Formationen in den Wurzeln und die oft in diesen herrschende Metamorphose der Gesteine. Allerdings muß hierzu bemerkt werden, daß der Zusammenhang einer nicht-metamorphen Decke mit einer metamorphosierten Wurzel bisher noch nicht nachgewiesen ist.

Ein durch die Erosion (oder durch Abreißen) entstandenes Loch in einer Ueberschiebungsdecke, in dem die Unterlage der Decke sichtbar wird, nennt man (einerlei, ob diese Unterlage autochthon ist oder selbst schwimmt) ein Fenster (Fig. 20 links und zwischen den Deckschollen). Mit Vorliebe bildet sich ein Fenster am Joch einer Decke. Die das Fenster umgebenden Teile der Decke nennt man die Umrandung des Fensters oder den Fensterrahmen.

Ein Erosionsloch in einer Sedimenthülle, durch das die kristalline Unterlage dieser letzteren sichtbar wird, als Fenster zu bezeichnen, ist unrichtig. Ebensowenig darf ein mehr oder weniger seiner Hülle beraubtes Massiv oder ein altkristallines Massiv überhaupt als Unterlage einer Decke bezeichnet werden. Eine Hüllenabtragung von länglicher Form, durch die die kristalline Unterlage hervorschaut, ist Knopfloch genannt worden.

Eine Deckscholle oder Klippe ist ein durch die Erosion ringsum freigelegtes, von der Hauptmasse der Decke losgetrenntes

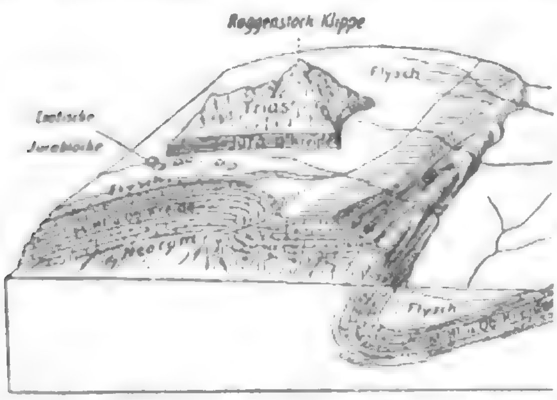


Fig. 28. Perspektivische Ansicht einer schwimmenden, wurzellosen Deckscholle. In der Unterlage eine kleine Faltenüberschiebung und eine überkippte Mulde. Roggenstock bei Iberg, Schweiz. Nach Quereau.

Stück einer Ueberschiebungsdecke (über andersartig entstandene Klippen vgl. S. 887). Eine Deckscholle schwimmt wurzellos auf ihrer Unterlage (Fig. 28). Sie kann aus mehreren übereinanderliegenden Decken herausgeschnitten sein. Das Wort Deckscholle (Klippe) wird nur auf kleinere Deckenstücke angewandt. Große Deckschollen bezeichnet man zwar auch wohl als „riesige Deckschollen", aber besser als Ueberschiebungsmassen (Schubmassen) oder wurzellose Gebirge (Fig. 29). Ein solches kann in den großen Zügen das Bild eines

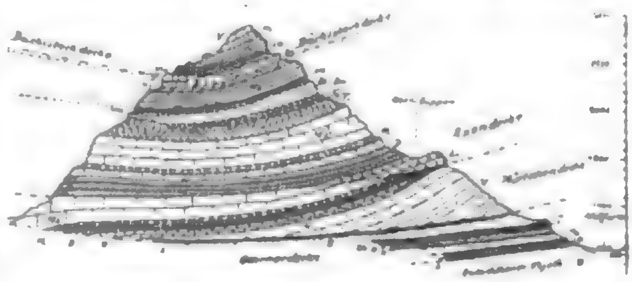


Fig. 29. Profil durch eine wurzellose Ueberschiebungsmasse, bestehend aus einem Paket von 4 durch die Erosion zerschnittenen Decken, die auf dem autochthonen Tertiärflysch schwimmen. Jeweilige Ausspitzung der älteren Schichten nach vorn. Verschiedene Mächtigkeit derselben Formation in verschiedenen Decken (z. B. von M_2). Das schwarze Band an der Basis der Glarner- und der Mürtschendecke bezeichnet den mylonitisierten Mittelschenkel. Vrenelesgärtli, Glarner Alpen, Schweiz. V Verrucano (Perm), R Rötidolomit (Trias), L mylonitisierter Malm, Li Lias, D Dogger, M, T Malm, B, V, N, U untere Kreide, S obere Kreide, E Tertiär. Nach Oberholzer.

einfach gebauten Faltengebirges bieten, doch wird sich der komplizierte Bau oft in Verquetschungen, tektonischen Lücken, eigenartigen Faciesverhältnissen usw. zu erkennen geben.

Ein exotischer Block ist eine Deckscholle von winzigen Dimensionen (Exotischer Block = Scherling s. S. 888).

Ein durch die Erosion aus einer Sedimenthülle herausgeschnittenes Stück dieser letzteren darf nicht als Deckscholle, sondern muß als Erosionsrest oder Lappen bezeichnet werden.

Schaut eine gewölbte Deckfalte oder Decke, die beiderseits im Streichen absinkt, mit ihrem Joch aus einem Fenster in darüberliegenden Decken heraus, so spricht man von ihrem Rückenschild. In einem solchen herrscht also periklinales Fallen.

Eine gewölbte Sedimenthülle über den kristallinen Gesteinen einer Decke ist auch wohl als Rückenschild bezeichnet worden.

Unter dem Stirnrand versteht man einen durch die Erosion erzeugten Rand in der Stirnregion einer Decke, dessen Längserstreckung mehr oder weniger genau parallel zum Streichen der Decke verläuft. Einen ebenso gerichteten Erosionsrand in einer

Decke, der nach der Wurzel hinschaut, heißt **Wurzelrand** (Fig. 20).

Anhänger der Hypothese der Deckenentstehung durch Abgleiten werden statt Wurzelrand **Abriß(rand)** sagen müssen. Selbstverständlich kann ein solcher Abrißrand nachträglich durch Erosion modelliert und verändert sein.

Schnitte von Decken mit der Erdoberfläche erscheinen an dieser als Zonen. Diese haben je nach der Schnittlage einen geraden oder gewundenen Verlauf. Zonen, in denen

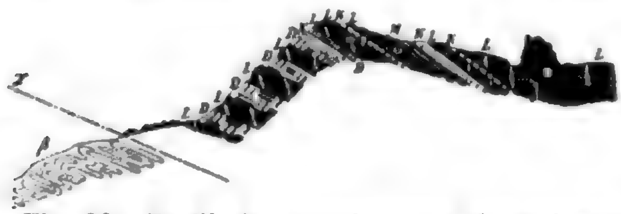


Fig. 30. Profil einer geschuppten Quetschzone. Vielfache Wiederholung derselben Schichten übereinander. Plattenhorn, Plessurgebirge bei Arosa, Schweiz: K kristalline Schiefer, D Triasdolomit, L Lias, M Radiolarit des Malm, Schwarz: Serpentin, β Bündner Schiefer, X Ueberschiebung. Nach Hoek.

verquetschte Decken (Mittelschenkel, Basis) ausstreichen, werden **Quetschzonen** (Fig. 30), oder wo solche, z. B. durch das Ausstreichen mehrerer Decken, sehr große Dimensionen erreichen, **Aufbruchszonen** genannt. Wird eine im Streichen absinkende

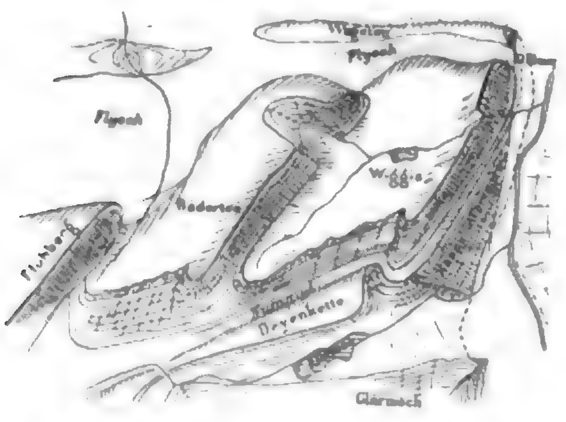


Fig. 31. Perspektivische Ansicht einer tektonischen Treppe. Vier Decken, deren tiefste größtenteils unter der Erdoberfläche liegt. Die 2. und 3. (Wiggis- und Rädertendecke) sind durch ein Synklinalscharnier verbunden. Wageten und die Kette oberhalb des Wortes Flysch sind Teile einer frontalen Gliederkette. Schematisierte Ansicht der Glarner Decken nördlich des Klöntals, Schweiz. Nach Lugeon.

Deckenhäufung von der Erdoberfläche schräg durchschnitten, so entsteht eine **tektonische Treppe** (Fig. 31).

Schnitte von Ueberschiebungsflächen mit der Erdoberfläche erscheinen, wenn sie nicht etwa mit ihr zusammenfallen, als Linien. Charakteristisch ist oft die Parallelität dieser Linien mit den Isohypsen (bei horizontalen. Ueberschiebungsflächen).

Auf **geologischen Karten** werden Ueberschiebungslinien durch starke (schwarze oder rote) Linien markiert, manchmal mit Zacken nach der Wurzelseite. Doch werden selbst auf Spezialkarten die Grenzen der Schubmassen oft nicht besonders bezeichnet.

4c) **Massive.** Unter einem **Massiv** im tektonischen (nicht im morphologischen und petrographischen) Sinne versteht man eine durch Erosion (oder Abgleiten der Sedimenthülle?) freigelegte Masse aus alten kristallinen Gesteinen. Es gibt **wurzelnde** und **wurzellose Massive**. Solche, die den Kern von Decken bilden, nennt man **Deckmassive**. Eine Deckfalte aus altkristallinen Gesteinen kann ein **Deckfaltenmassiv** bilden. Die Oberfläche eines Massivs, also die Auflagerungsfläche der jüngeren Gesteine (oder die durch Denudation geschaffene Oberfläche eines Massivs), senkt sich in der Streichrichtung des Gebirges oder auch quer dazu unter die jüngeren Gesteine. Man nennt das das **Absinken** oder **Untertauchen**, auch wohl **Einstreichen** eines Massivs.

4d) **Faltung nach Erosion.** Im allgemeinen nimmt man an, daß die Faltung sich in Gesteinskomplexen vollzieht, die von der Erosion noch nicht zerschnitten sind. Auch die Bildung der Ueberschiebungsdecken, von deren Mechanismus man noch keine ganz klare Vorstellung hat, hält man für ein Phänomen der Tiefe, nicht etwa für eine Bewegung unter freiem Himmel. Verschiedentlich sind aber auch abweichende Meinungen laut geworden. Man hat Ueberschiebungen in erodierten Falten (**Erosionsüberschiebungen**), Verfrachtung von Deckschollen durch Deckenbildung und Faltung in ihrer Unterlage, Anbranden von Decken an erodiertes vorlagerndes Gebirge, Bewegungen in bereits geöffneten Fenstern usw. angegeben.

5. **Transversalverschiebungen.** Außer in Faltung äußert sich der tangentiale Druck auch oft in Zerreißungen längs annähernd vertikaler Flächen, an denen horizontale oder schwach auf- oder abwärts gerichtete Verschiebungen zweier Schollen aneinander eintreten. Diese Verschiebungen sind in Falten quer oder schräg zum Streichen gerichtet. Man nennt sie **Horizontalverschiebung**, (horizontale) **Transversalverschiebung**, **Blatt**.

An den Verschiebungsflächen können die Schollen dicht aneinanderliegen, oder es kann zwischen ihnen eine Spalte klaffen. Auf der Verschiebung finden sich oft Dislokationsbreccien oder größere **eingeklemmte Schollen**. Oft weisen die

Blätter Schrammen und Striemen (aus deren Verlauf Schlüsse auf die Richtung der Bewegung gezogen werden können), sowie Rutschflächen auf. Sind letztere glatt und wie poliert, so nennt man sie Harnische oder Spiegel. Diese Gebilde sind bei der Reibung der Schollen aneinander entstanden.

Die Schollen zu beiden Seiten einer Transversalverschiebung werden Bruchflügel genannt. Oft weisen sie eine Schleppung auf, d. h. die Schichten des vorwärts bewegten Flügels sind rückwärts, die des andern an der Verschiebung vorwärts gebogen — Schleppblatt. Die Schleppung kann auf einen Flügel beschränkt sein. Kommt es überhaupt nur zu einer Verbiegung der Schichten ohne Bruch, so nennt man die Dislokation Horizontalflexur oder Flexurblatt (Gegensatz: Bruchblatt).

Eine längere Folge von Transversalverschiebungen, die sich fortsetzen oder ablösen, heißt Bruchzug; mehrere annähernd parallele Blätter bilden ein Bruchbüschel oder Blattbündel oder Blattsystem.

Das Bild der Transversalverschiebungen im Grundriß ist analog demjenigen der Verwerfungen (resp. Flexuren) im Profil. Das Ausmaß einer Transversalverschiebung wird entsprechend der Sprunghöhe einer Verwerfung ermittelt.

6. Schollenüberschiebung, Spaltdecken usw. Eine Schollenüberschiebung ist eine geneigte Bewegungsfläche, an der eine Scholle eine schräg aufwärts gerichtete Bewegung an einer anderen Scholle vollführt hat. Andere Bezeichnungen für diese Art der Dislokationen sind: Aufschiebung, Uebersprung, Wechsel, Ueberschiebung, Kompressionsverwerfung, Konjunktivbruch, Stauungsbruch.

Von diesen Ausdrücken sind die mit -verwerfung und -bruch zusammengesetzten unzweckmäßig, weil die Schollenüberschiebungen von den Verwerfungen scharf zu scheiden sind (vgl. S. 895). Ueberschiebung wird heute mehr und mehr auf die (aus Falten hervorgegangenen) Deckenüberschiebungen beschränkt, Aufschiebung bezeichnet nur eine geringe Bewegung.

Von den Faltenüberschiebungen und Deckenüberschiebungen unterscheiden sich die Schollenüberschiebungen dadurch, daß sie nicht unter Mittelschenkelreduktion aus Falten hervorgehen. Die Unterscheidung dürfte gelegentlich schwer fallen. Es soll aber auch gerade die Bewegung gewisser Ueberschiebungsdecken an ähnlichen Flächen stattgefunden und in einer Blockbewegung der ganzen Massen auf in der Erdkruste aufgespaltenen Scheerflächen bestanden haben. Solche Decken heißen Spaltdecken. Eine Bewegung (abwärts) an Scheerflächen wird ja eigentlich auch für die Gleitdecken postuliert. Dringt eine Ueberschiebungsdecke ungestüm gegen die Wurzel tieferer Decken vor, so schneidet (scheert) sie dieselben manchmal quer ab.

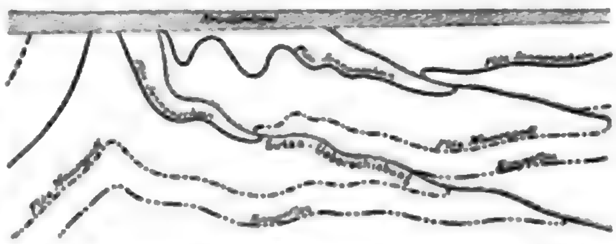


Fig. 32. Gefaltete Schollenüberschiebung. Profil durch die westfälische Steinkohlenformation mit Angabe der Leitflötze, die durch zwei Schollenüberschiebungen (durch Punkte geschummert; eine ist als Sutan-Ueberschiebung bezeichnet) verschoben sind. Die Ueberschiebungsflächen sind nachträglich gefaltet. Aus K. Keilhack, Lehrbuch der praktischen Geologie.

Als hierher gehörig muß wohl auch die seltene „Ueberschiebung jüngerer Schichten über ältere" betrachtet werden, ferner auch die Bewegungsfläche an der Basis einer Abscheerungsdecke. Unter einer solchen versteht man einen Schichtkomplex, der ohne wesentliche Horizontalverfrachtung mehr oder weniger innerhalb seines ursprünglichen Bildungsraumes unter Loslösung von seiner Unterlage und ohne daß diese mit in die Faltung eintritt, gefaltet worden ist (Fig. 33).

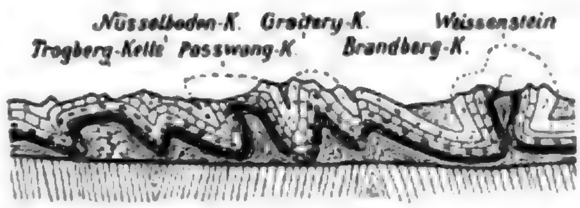


Fig. 33. Gefaltete Abscherungsdecke. Unten altgefaltete Gneise, darüber diskordant und horizontal (schwarze Linie), Perm, Buntsandstein, unterer Muschelkalk. Diese treten nicht mit in die Faltung der jüngeren Schichten (mittlerer Muschelkalk bis Tertiär) ein, so daß diese eine g. A. bilden. Rechts in dieser eine Fächerfalte mit abgeschnürtem Sattelkern. N.—S.-Profil durch ein Stück des schweizerischen Kettenjura auf dem Meridian von Solothurn. Nach Buxtorf.

Sind an zwei benachbarten Schollenüberschiebungsflächen die Bewegungen gegeneinander gerichtet, so entsteht eine nach oben keilförmige Scholle, die innerhalb der beiden Aufschiebungen eine relativ gesenkte Lage einnimmt. Besitzt diese Scholle eine ansehnliche Längsausdehnung, so wird sie ein überschobener Graben genannt.

An dieser Stelle möge erwähnt sein, daß man „überschoben" die Masse nennt, über

die sich eine Ueberschiebung hin bewegt hat, „übergeschoben" dagegen die bewegte Masse.

Das Ausmaß einer Schollen- oder einer Faltenüberschiebung wird nach der Sprunghöhe und -deckung gemessen. Ebenso

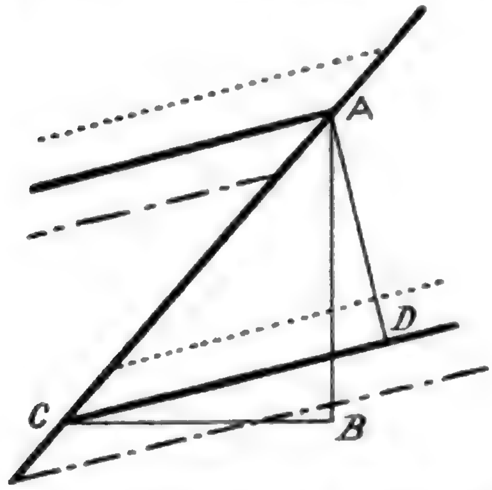


Fig. 34. Sprunghöhen und -deckungen bei Schollen- und Faltenüberschiebungen. AB vertikale Sprunghöhe, AC flache Sprunghöhe, AD Sprunghöhe senkrecht zur Schichtung, BC Denkung nach dem Lot, DC nach der Schichtnormalen.

wie bei Verwerfungen kann man neben der vertikalen Sprunghöhe die flache und die Sprunghöhe senkrecht zur Schichtung (stratigraphische Sprunghöhe) unterscheiden und die Deckung nach dem Lot und nach der Schichtnormalen. Die Bedeutung dieser Begriffe ist aus Fig. 34 ersichtlich. Näheres siehe S. 896; das dort Ausgeführte findet sinngemäße Anwendung auf die Ueberschiebungen.

Auch Schollenüberschiebungen können nachträglich gefaltet werden (Fig. 32).

B. Radiale Dislokationen.

1. Flexuren. Werden einzelne Stücke der Erdrinde in mehr oder weniger genau vertikaler Richtung gegeneinander verschoben, so können diese Schollen im Zusammenhang bleiben oder zerreißen. Im ersteren Falle findet nur eine Abbiegung der Schichten statt, die man als Flexur oder Monoklinalfalte bezeichnet.

Eine Flexur ist eine doppelt-knieförmige Schichtenbiegung mit drei Schenkeln, von denen zwei eine annähernd horizontale Lage haben und mehr oder weniger ausgedehnt zu sein pflegen, während der mittlere, meist relativ kurze sogenannte Verbindungsschenkel eine flach oder steil geneigte Lage besitzt. (Fig. 35.)

Obwohl die Flexur die Gestalt eines Doppelknies hat, nennt man sie trotzdem auch wohl Kniefalte. Von einer Falte unterscheidet sich die Flexur durch die für ihr Wesen notwendige doppelte Biegung.

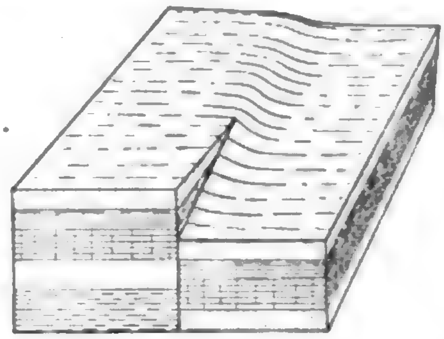


Fig. 35. Perspektivische Ansicht einer radialen Dislokation in einer Tafel, halb Flexur, halb Vertikalverwerfung mit einseitiger Schleppung. Nach Chamberlin und Salisbury.

Die obere Biegung des Verbindungsschenkels heißt Abbeugung oder Antiklinale der Flexur, die untere Aufbeugung oder Synklinale der Flexur.

Zwei parallele Flexuren senken zwischen sich eine Scholle ein, die man, wenn sie lang und schmal, als Flexurgraben bezeichnet. Durch zwei Absenkungen an parallelen Flexuren an den Rändern derselben Scholle entsteht ein Flexurhorst.

Flexuren finden sich nur in horizontalen oder fast horizontalen Schichten. Eine Flexur bedeutet die Knickung einer Tafel. Es gibt Flexuren mit einem „stabilen Knoten der Flexur", um den sich alles Andere wie um ein Scharnier dreht, so daß man von einem gehobenen und einem gesenkten Flügel der Flexur sprechen muß.

Im Verbindungsschenkel einer Flexur machen sich oft Zerrungen bemerkbar, die zu seiner Reduktion, Dehnung und Zerreißung führen können. Schließlich tritt Bruch ein und an die Stelle der Flexur tritt (Fig. 35) die Verwerfung.

2. Verwerfungen. 2a) Definitionen. Eine Verwerfung ist ein Bruch, an dem eine von zwei benachbarten Schollen eine Absenkung erfahren hat.

Die von einer Verwerfung durchsetzten Schichten sind zerschnitten, zerbrochen, verworfen, abgescheert.

Es läßt sich nicht immer bestimmt angeben, ob die Verschiebung zweier, zu beiden Seiten einer Verwerfung gelegenen Schollen durch Senkung der einen oder Hebung der anderen oder gleichzeitige Hebung der einen Scholle und Senkung der anderen herbeigeführt worden ist. Immer aber kann die Verwerfung nach dem Bilde, das sie bietet, durch Absinken einer der beiden Schollen entstanden sein.

Die Verwerfungen sind Dehnungs-, Zerrungs-, Disjunktivbrüche. Schollen- und Faltenüberschiebungen sollten niemals Ver-

werfungen genannt werden, mit anderen Worten: die Bezeichnung „Verwerfung" sollte von allen Dislokationen ausgeschlossen bleiben, bei denen die Scholle über einer schräg fallenden Bewegungsfläche eine tektonisch höhere Lage hat als die Scholle unter der Dislokation.

Die Schollen zu beiden Seiten einer Verwerfung nennt man ihre Flügel. Ohne Rücksicht auf die Bewegung, die tatsächlich stattgefunden hat, heißt die Scholle in tektonisch tieferer Lage der gesenkte, die andere der gehobene Flügel. Von mehreren, von Verwerfungen begrenzten Schollen bezeichnet man die relativ gesenkten als Tief-, die relativ gehobenen als Hochschollen. In demselben Sinne bezeichnet man gesenkte Schollen(komplexe) als Senkungsgebiete (Senkungsfelder), gehobene als Hebungsgebiete.

Die Verschiebung der beiden Flügel erfolgt an der Verwerfungs- oder Bruchfläche. Steht diese nicht senkrecht, so besitzt sie eine Streich-, eine Fallrichtung und einen Einfallswinkel. Sie braucht nicht eine ebene Fläche zu sein und kann ihr Streichen ändern. Eine Verwerfung mit senkrecht stehender Fläche wird eine saigere oder eine Vertikalverwerfung (oder -verschiebung) genannt. Eine normale Verwerfung besitzt eine geneigte Bruchfläche. Die durch die Verwerfung am hangenden Flügel erzeugte Kante heißt Schollenkante. Der Schnitt einer Verwerfungs- und der Erdoberfläche ergibt eine Verwerfungs-, Abbruchs- oder Bruchlinie. Diese besitzt ein Streichen oder eine Richtung, die nicht immer geradlinig zu sein braucht, sondern sich ändern kann.

Eine Verwerfung endigt durch Abnahme ihrer Sprunghöhe bis auf Null oder durch Abstoßen an einer anderen Verwerfung. Natürlich kann in diesen Fällen auch vom Ausgangspunkt der Verwerfung gesprochen werden.

Mit „Verwerfung" gleiche Bedeutung haben die Ausdrücke: Bruch, Sprung, Spalte, Rücken, Gewand, Absenkung, Heraushebung (p.p.), Schichtenverschiebung, Verschiebung (Schichten)abbruch, Paraklase. Mit „Spalte" verbindet sich dabei nicht notwendig der Begriff eines Klaffens der Verwerfung. Doch kommen neben geschlossenen auch klaffende Verwerfungsspalten vor. Letztere sind aber häufig durch Reibungsbreccie oder Gangmineralien ausgefüllt. Man beobachtet an den Verwerfungen auch Rutschflächen, Harnische, Spiegel, eingeklemmte Schollen usw.

Verwerfungen durchsetzen sowohl Schicht- wie Eruptivgesteine. Sie können ferner in horizontalen, geneigten, gefalteten Schichten sowie in Ueberschiebungsdecken auftreten. Hieraus ergibt sich in Verbindung mit der verschiedenen Lage der Bruchfläche die große Mannigfaltigkeit im Habitus der Verwerfungen.

Bei einer Verwerfung in einer Schichttafel können die Schichten einer bewegten Scholle ihre horizontlae Lage bewahren oder eine Neigung erfahren (aufgerichtet werden), so daß eine schräge Scholle entsteht.

Eine „schräggestellte Scholle" ist im übrigen jede Scholle, die durch eine Verwerfung eine solche Stellung bekommen hat, daß ihre vorher horizontale Oberfläche eine Neigung aufweist. Die Kante, die an der höchsten Seite der schrägen Oberfläche hinläuft, heißt die gehobene oder die aufgekippte Kante, die schräge Oberfläche die Lehne der Scholle.

Bei einer geneigten Verwerfungsfläche nennt man den oberhalb derselben gelegenen Flügel das Hangende, den darunter gelegenen das Liegende.

2b) Streichen und Fallen der Verwerfungen. Für Verwerfungen in geneigten und saigeren Schichten gelten folgende Bezeichnungen: Parallel zum Streichen gerichtete Verwerfungen heißen streichende oder Längsverwerfungen, schief dazu gerichtete spießeckige, Diagonalverwerfungen, oder auch, wegen des Bildes der durch sie erzeugten Verschiebungen, Streckungsbrüche. Quer zum Streichen laufende Brüche werden querschlägige oder Querverwerfungen (-störungen) genannt.

Eine Vertikalverwerfung in saigeren Schichten bewirkt keine Verschiebung derselben insofern, als die gleichen Schichten nebeneinander liegen bleiben, wenn auch der ursprüngliche Zusammenhang zerrissen wird.

Eine streichende Vertikalverwerfung erzeugt in geneigten Schichten eine um so größere Niveauveränderung für die einzelnen Schichten, je flacher deren Lagerung ist.

Fällt eine normale Verwerfung in geneigten Schichten in der gleichen Richtung wie diese, so nennt man sie rechtfallend, fällt eine solche Verwerfung in entgegengesetzter Richtung wie die Schichten, so heißt sie widersinnig fallend. Man spricht auch von rechtfallenden und gegenfallenden Schichten.

Je nach dem Streichen und Fallen der normalen Verwerfungen im Verhältnis zum Streichen und Fallen der Schichten sind also folgende Fälle möglich:

1. Verwerfung streichend, rechtfallend;
2. Verwerfung streichend, widersinnig fallend;
3. Verwerfung spießeckig, rechtfallend;
4. Verwerfung, spießeckig, widersinnig fallend.

Eine rechtfallende Verwerfung vermehrt, eine widersinnig fallende vermindert den Betrag der Absenkung verglichen mit dem durch eine Vertikalverwerfung bewirkten. Dies wird besonders bei mehreren derartigen Verwerfungen deutlich.

2c) Sprunghöhe und -weite (Fig. 36). Unter der **vertikalen Sprunghöhe** oder der **Sprunghöhe** schlechthin versteht man den Betrag der vertikalen Verschiebung, den zwei Schollen an einer Verwerfung erfahren haben. Die Sprunghöhe wird stets im Profil, d. h. auf einer senkrecht zur Verwerfungsfläche stehenden Ebene gemessen.

Die Sprunghöhe einer Vertikalverwerfung in nicht saigeren Schichten ist gleich dem Abstande zweier stratigraphisch gleichwertigen Punkte zu beiden Seiten der Verwerfungsfläche, auf dieser gemessen. Die Sprunghöhe einer normalen Verwerfung ist gleich dem Höhenunterschied gleichwertiger Bruchpunkte.

Um die vertikale Sprunghöhe zu ermitteln, fällt man im Profil vom Schnittpunkt einer Schichtfläche des Liegenden mit der Verwerfungsfläche und der Profilebene ein Lot auf die Horizontale durch den gleichwertigen Punkt des Hangenden.

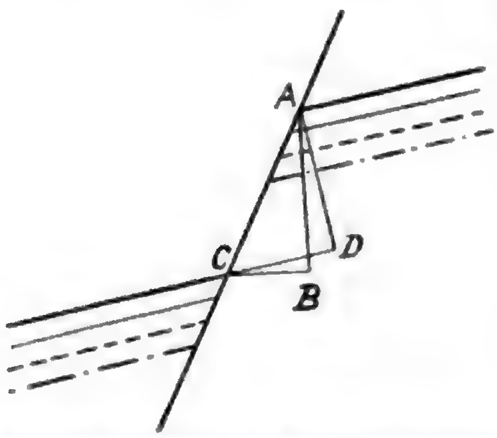


Fig. 36. Normale, rechtfallende Längsverwerfung im Profil. AB vertikale, AC flache Sprunghöhe, AD Sprunghöhe senkrecht zu Schichtung (stratigraphische Sprunghöhe), CB Horizontalsprungweite, CD Sprungweite in der Schichtebene.

Als **flache Sprunghöhe** bezeichnet man den Betrag der schrägen Absenkung an einer geneigten Bruchfläche.

Sie ist im Profil gleich dem Abstande von zwei gleichwertigen Punkten an der Verwerfung.

Als **Sprunghöhe senkrecht zur Schichtung** oder **stratigraphische Sprunghöhe** bezeichnet man den kürzesten Abstand der Ebenen derselben Schichtfläche zu beiden Seiten der Verwerfung.

Um sie zu ermitteln, fällt man im Profil vom Schnittpunkt der einen Schichtfläche mit der Verwerfung ein Lot auf die Verlängerung der gleichen Schichtfläche im anderen Flügel über die Verwerfung hinaus.

Unter **Horizontalsprungweite** versteht man die in der Horizontalprojektion gemessene Entfernung zweier gleichwertiger Punkte (also z. B. der Schnittränder derselben Schicht) im Profil der Verwerfung.

In der Konstruktion ist sie die horizontale Entfernung des Fußpunktes desjenigen Lotes, das die vertikale Sprunghöhe darstellt, von der Verwerfung.

Als **Sprungweite in der Schichtebene** bezeichnet man die auf die Schichtebene projizierte Entfernung zweier gleichwertiger Punkte an der Verwerfung.

Diese Sprungweite entspricht dem Betrage, um den man eine Schicht des gesunkenen Flügels über die Verwerfung hinaus verlängern muß, um den Fußpunkt desjenigen Lotes zu erreichen, das die stratigraphische Sprunghöhe darstellt.

Einige besondere Fälle sind:

Bei einer Vertikalverwerfung in horizontalen Schichten fallen alle drei Arten von Sprunghöhen zusammen und beide Arten von Sprungweiten sind gleich Null.

Bei einer Vertikalverwerfung in geneigten Schichten fallen vertikale und flache Sprunghöhe zusammen; die Horizontalsprungweite ist gleich Null.

Bei einer normalen Verwerfung in horizontalen Schichten fallen die vertikale und die stratigraphische Sprunghöhe zusammen, ebenso die beiden Sprungweiten.

Verschiedene Werte für alle verschiedenen Arten von Sprunghöhen und -weiten ergeben sich nur bei geneigten Schichten und geneigter Verwerfungsfläche, sofern diese und jene nicht einen rechten Winkel bilden.

Wo es sich nur um wissenschaftliche, nicht um praktische Fragen handelt, wird von einer Verwerfung im allgemeinen nur die (vertikale) Sprunghöhe angegeben.

2d) Verwerfungen in gefalteten Schichten. Sind die von Verwerfungen durchsetzten Schichten gefaltet, so kann man ebenfalls Längs-, Quer- und Diagonalverwerfungen (-brüche, -störungen) unterscheiden. Nach der Lage in den Falten bezeichnet man die längs verlaufenden Brüche als **Gewölbescheitelbrüche** (**antiklinale Verwerfungen**), **Gewölbeschenkelbrüche**, **Muldenscheitelbrüche** (**synklinale Verwerfungen**). Man nennt solche Brüche in Falten wohl **schwächende**, weil sie die Wölbung verringern, während Ueberschiebungen im Mittelschenkel und Aufschiebungen im hangenden Schenkel auf die Wölbung **verstärkend** wirken.

2e) Zusammentreten mehrerer Verwerfungen. Größere Verwerfungen bestehen oft nicht nur in einem einzelnen Bruch, sondern in einer Anzahl unter sich mehr oder weniger paralleler Brüche, so daß an die Stelle einer Abbruchslinie eine **Abbruchszone** tritt. Eine solche Gruppe eng zusammengehöriger Verwerfungen bezeichnet man wohl als **Büschel** von Verwerfungen oder als eine **zusammengesetzte Verwerfung** im Gegensatz zur **einfachen**.

a) **Staffelbrüche.** Laufen mehrere Verwerfungen nebeneinander her, von denen

jede die Absenkung des nach derselben Himmelsrichtung gelegenen Flügels bewirkt („gleichsinnige" Brüche), so entsteht eine treppenförmige Verwerfung (Treppenverwerfung, Staffelbruch; Fig. 37).

Eine Staffel ist eine Scholle zwischen zwei Einzelverwerfungen eines Staffelbruches.

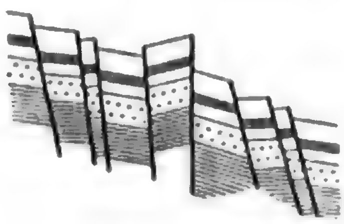


Fig. 37. Staffelbruch mit fortläufigen Staffeln, in die sich eine rückläufige Staffel einschaltet. Der Staffelbruch erzeugt Bruchstufen. Nach de Margerie und Heim (geändert).

Fortläufige Staffeln zeigen eine beständige Zunahme des Absenkungsbetrages, während eine rückläufige Staffel einen vorher erreichten Absenkungsbetrag z. T. wieder aufhebt (Fig. 37).

Eine Verwerfung, die unter einer Anzahl von Verwerfungen gleicher oder ähnlicher Richtung die größte Sprunghöhe besitzt, nennt man Verwerfung I. Ordnung oder Hauptverwerfung im Gegensatz zu Verwerfungen II. Ordnung oder Nebenverwerfungen.

Eine Randverwerfung (-spalte, -bruch) ist eine Hauptverwerfung, die eine tektonische oder eine orographische Einheit randlich begrenzt. Bei einer staffelförmigen Randverwerfung entwickeln sich Randstaffeln.

Eine verästelte, verzweigte, zersplitterte oder zertrümmerte Verwerfung ist eine solche, von der sich seitliche Sprünge abzweigen.

β) Horste und Gräben. Ein Horst ist eine mehr oder weniger lang gestreckte, von annähernd parallelen Längsrändern begrenzte Hochscholle zwischen zwei Tiefschollen.

Ein Halbhorst ist eine orographisch als Horst erscheinende, langgestreckte, schräggestellte Hochscholle mit einer Randverwerfung nur an der Seite der gehobenen Kante.

Eine eigentümliche, in ihrer Entstehung noch umstrittene Art von Horsten sind die sogenannten Salzhorste Norddeutschlands. (Fig. 38).

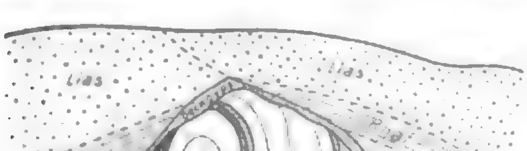


Fig. 38. Ein norddeutscher Salzhorst („Einigkeit" bei Fallersleben). Nach Stille.



Fig. 39. Gräben und Horst: Die mit mo bezeichnete Scholle links ist ein Horst, die schmale Scholle links daneben ein Graben, die Schollen co, co sind Gräben (Profil durch die Kreidegräben im Triasgebiet östlich des Egge-Gebirges bei Neuenheerse, so oberer Bundsandstein, mu, mm, mo unterer, mittlerer, oberer Muschelkalk, km mittlerer Keuper, cu, co untere, obere Kreide). Nach Stille.

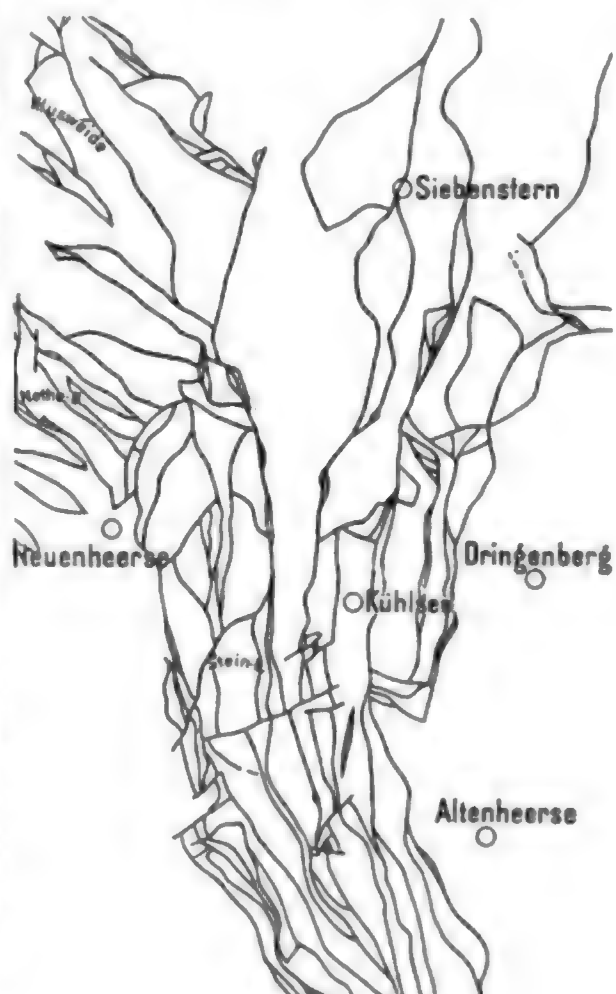


Fig. 40. Sprungsystem (Karte des Sprungsystems von Willebadessen am Osning). Nach Stille.

Ein Graben (Graben[ver]senkung, Versenkung, Senke) ist eine zwischen zwei mehr oder weniger parallelen Verwerfungen eingesunkene Scholle, mit anderen Worten eine Tiefscholle von ansehnlicher Längserstreckung zwischen zwei Hochschollen (Fig. 39).

Die Verwerfungen bilden den Rand des Grabens oder Horstes.

γ) Sprungsysteme, geologische Achsen. Ein Bruch- oder Sprungsystem besteht aus einer Anzahl von Verwerfungen, die durch enge Nachbarschaft oder unmittelbare Verbindung oder durch gleiche Richtung in naher Beziehung zueinander stehen (Fig. 40).

Die Linie höchster Schollenheraushebung in einem Bruchsystem ist geologische Achse genannt worden (Fig. 41).

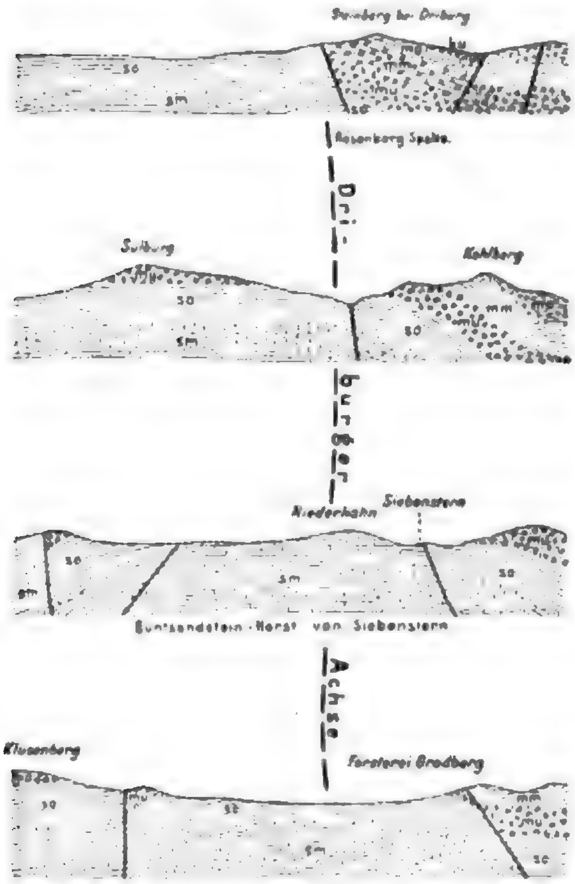


Fig. 41. Geologische Achse (4 Profile durch die Driburger Achse zwischen Driburg und Försterei Gradberg, Wesergebirgsland. sm, so mittlerer, oberer Buntsandstein, mu, mm, mo unterer, mittlerer, oberer Muschelkalk, ku unterer Keuper.) Nach Stille.

Eine geologische Achse kann sich verzweigen (Achsenverzweigung), indem sich von ihr Zweigachsen abspalten. Ein Graben in einer geologischen Achse wurde als Sattelspalte bezeichnet.

Brücke nennt man das Zwischenstück zwischen zwei beginnenden, entgegengesetzt gerichteten Verwerfungen. Verschmälert sich eine Brücke bis auf Null, so resultieren zwei im Streichen zusammenfallende Verwerfungen, eine sogenannte Drehverwerfung. An einer solchen nimmt die Sprunghöhe von einem mittleren Punkte gegen die Enden immer mehr zu. An dem mittleren Punkte, dem Wendepunkt, hat eine Schaukelbewegung für beide Flügel stattgefunden, und zwar für den einen im entgegengesetzten Sinne wie für den anderen.

Oft schneiden Brüche in der Tiefe aneinander ab, so daß keilförmige Stücke entstehen. Diese Erscheinung beobachtet man besonders bei Verwerfungen, die sich schneiden (kreuzen) — Sprungkreuzung. Die verwerfende Verwerfung ist jünger als die verworfene.

Ein System konzentrischer, bogenförmig verlaufender Brüche um ein Senkungsfeld nennt man Kesselbrüche, das durch sie geschaffene Senkungsgebiet Kessel. Meist sind mit den konzentrischen peripherischen Brüchen (die sich nicht immer zu Kreisen zusammenzuschließen brauchen) Radialsprünge verbunden, so daß eine Bruchnetz entsteht.

Ein von Verwerfungen durchsetztes Gebiet horizontaler Schichtung wird eine zerbrochene Tafel genannt; sind die Brüche sehr zahlreich, so sagt man wohl, das betreffende Stück der Erdrinde sei durch Verwerfungen zerhackt.

2f) Schleppung an Verwerfungen. Durch den Widerstand der bewegten Schollen an der Verwerfungsfläche werden oft die Schichtenden der absinkenden Scholle an der Verwerfung nach oben, die der anderen Scholle nach unten gebogen oder „geschleppt". Außer solchen „doppelseitigen Schleppungen" gibt es auch einseitige, bei denen die Schleppung an einem Flügel fehlt. Bei vielen Brüchen wird gar keine Schleppung beobachtet. Zwischen einer zerrissenen Flexur und einer Verwerfung mit Schleppung beider Flügel gibt es keine scharfe Grenze.

Eine widersinnige Schleppung richtet sich nach der entgegengesetzten Seite, wie man erwarten sollte. Ihre Entstehung läßt sich nur so erklären, daß sich an derselben Dislokation Bewegungen in entgegengesetzter Richtung gefolgt sind, also z. B. Flexurbildung und darauf Verwerfung mit relativer Hebung der durch die Flexur abgesenkten Scholle.

Obwohl Flexuren und Schleppungen einem von der Faltung prinzipiell verschiedenen Dislokationstypus angehören und mit dieser nicht verwechselt werden sollten, so kann die Unterscheidung am einzelnen Objekt doch Schwierigkeiten machen und sich nur unter Berücksichtigung des Charakters der Dislokationen der weiteren Umgebung ermöglichen lassen.

2g) Wiederholte Bruchbildung. Bruchbildung kann sich wiederholen. Die in der neuen Bruchperiode entstandenen

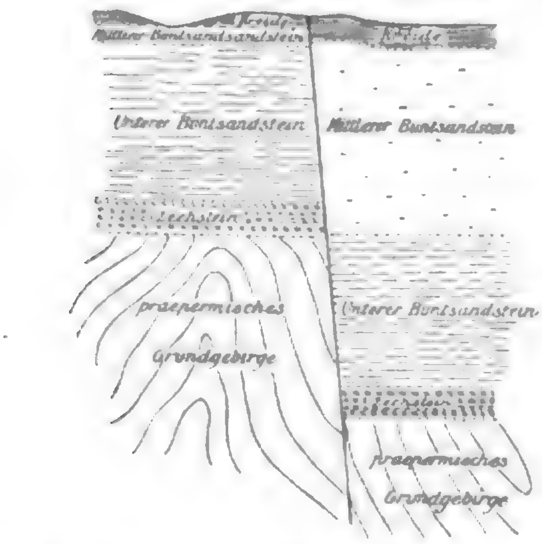


Fig. 42. Schematisches Profil durch eine wieder aufgelebte Verwerfung. Die Gesamtverschiebung beträgt ca. 350, die vor Ablagerung der Kreide erfolgte ca. 320 m (Westheimer Abbruch, südlichster Teutoburger Wald). Nach Stille.

Verwerfungen bilden sich entweder an neuer Stelle, wobei sie gelegentlich die älteren Brüche durchsetzen, oder eine Verwerfung lebt wieder auf (Fig. 42).

Unter Auslenkung versteht man eine Knickung in einer Verwerfungsfläche, die durch eine bereits vor dem Aufreißen der Verwerfung vorhandene Kluft herbeigeführt ist.

2h) Schollenstruktur. Je nachdem die Verwerfungen horizontale, aufgerichtete oder gefaltete Schichten durchsetzen und je nach ihrem Streichen, ist die Stellung der Schichten innerhalb der Schollen, also die innere Struktur der Schollen, verschieden. Darauf beziehen sich Namen wie Tafelscholle, Längs-, Diagonal-, Querhorst u. a.

2i) Radiale Dislokationen und Oberflächenformen. Radiale Dislokationen und Erosion. Eine Verwerfung erzeugt einen Niveauunterschied. Ist die Verwerfung noch jung, so überragt die stehengebliebene (gehobene) Scholle die gesunkene; es entsteht eine Bruchstufe (Fig. 37). Die Verwerfungsfläche liegt auf einer der flachen Sprunghöhe entsprechende Strecke frei und bildet den Verwerfungs(steil)absturz. Die Richtung, nach der sich dieser Absturz kehrt, ist die Verwerfungsfront. Die Front einer Verwerfung schaut also nach der absunkenen Scholle. Infolge der Einebnung der Geländehöhenunterschiede durch die Denudation trennen die Verwerfungen meist nicht mehr Schollen mit verschieden hoch gelegenen Oberflächen, sondern machen sich orographisch gar nicht bemerkbar. Solche Verwerfungen heißen geebnet oder abgehobelt.

Wird eine Tafel von einer Verwerfung durchsetzt, so liegt bei intakter Erhaltung der Bruchstufe an der Oberfläche beider Flügel die gleiche Schicht. Ist die Verwerfung aber geebnet, d. h. die gehobene Scholle bis zum

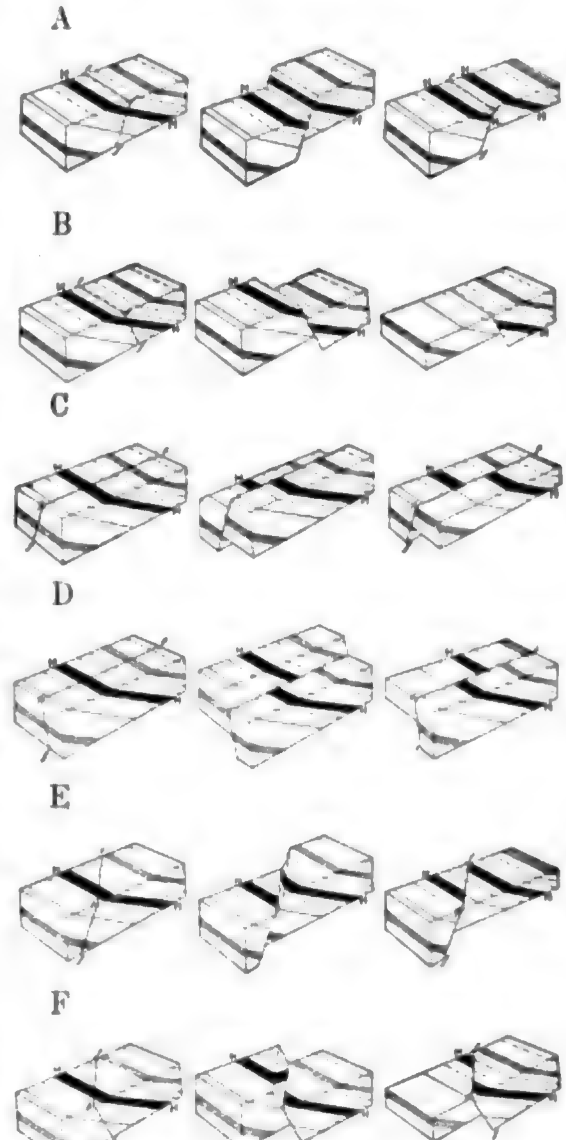


Fig. 43. Eingeebnete Verwerfungen von verschiedener Lage in geneigten Schichten. Links vor Eintritt der Dislokation, in der Mitte nach Eintritt derselben mit Bruchstufe, rechts nach Einebnung. f f f die Verwerfung, H H eine bestimmte Schicht. A Streichende widersinnige Verwerfung erzeugt Schichtenverdoppelung; B streichende rechtfallende Verwerfung erzeugt Schichtunterdrückung; C und D Querverwerfung erzeugt laterale Horizontalverschiebung der stehen gebliebenen Scholle; E widersinnig fallende Diagonalverwerfung erzeugt Schichtenverdoppelung mit diagonaler Verschiebung; F rechtfallende Diagonalverwerfung erzeugt Schichtentrennung mit diagonaler Horizontalverschiebung. Nach Chamberlin und Salisbury.

Niveau der gesenkten Scholle denudiert (wobei diese letztere ebenfalls eine Abtragung erfahren haben kann), so werden im allgemeinen zu beiden Seiten des Bruches verschiedene Schichten (Formationsstufen, Formationen) in gleichem Niveau nebeneinanderliegen. Meistens wird an diesem Merkmal im Gelände das Vorhandensein von Verwerfungen erkannt.

Durch die Abhobelung von Verwerfungen in geneigten und gefalteten Schichten werden je nach der Lage der Verwerfungen Schichtenwiederholungen („Repetitionsverwerfungen"), -unterdrückungen, -zerstückelungen und laterale Horizontalverschiebungen (nicht zu verwechseln mit horizontalen Transversalverschiebungen) hervorgerufen (Fig. 43, 44).

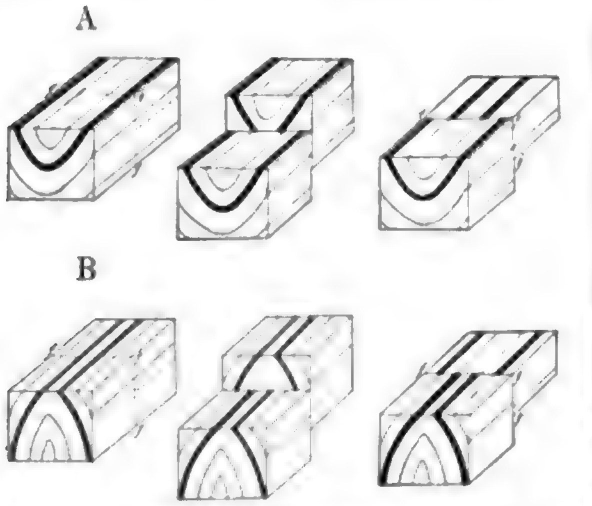


Fig. 44. Eingeebnete Querverwerfung in einer Mulde (A) und in einem Sattel (B). Nach Chamberlin und Salisbury.

2k) Darstellung der Verwerfungen auf geologischen Karten. Obwohl auf den geologischen Karten das Vorhandensein von Verwerfungen schon meist durch das Aneinanderstoßen verschiedenaltriger, nicht aufeinanderfolgender Formationen erkennbar wird, pflegt man doch die Verwerfungslinien durch dicke Linien hervorzuheben, an denen man wohl auf der Seite der gesunkenen Scholle eine Zähnung anbringt. Die Lage der Verwerfung (ob vertikal oder geneigt und nach welcher Richtung geneigt) kann aus der Karte abgelesen werden, weil je nachdem der Schnitt der Verwerfungsfläche mit den Geländeformen gerade oder gebogen verläuft und in die Täler hinein- oder aus ihnen herausbiegt (Fig. 45).

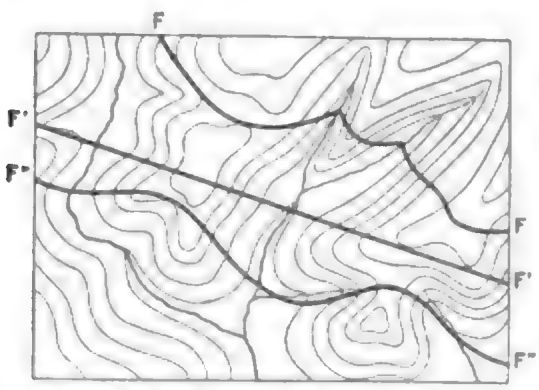


Fig. 45. Karte eines zertalten Geländes mit drei Verwerfunglinien, von denen F′—F′ der Austritt einer vertikalen, F—F derjenige einer talaufwärts (gegen den oberen Rand der Figur), F″—F″ derjenige einer talabwärts (gegen den unteren Rand der Figur) fallenden Verwerfungsfläche ist. Nach Haug.

Literatur. **v. Carnall,** *Die Sprünge im Steinkohlengebirge (Karstens Arch. f. Min. usw. Bd. 9). 1835.* — **E. Haug,** *Traité de Géologie, S. 193 bis 223, 237 bis 250, 1907.* — **A. Heim,** *Der Mechanismus der Gebirgsbildung* **2**, *und Atlas, 1878.* — **M. Jerosch,** *Die Querstörungen im mittleren Teil des Säntisgebirges. Beitr. z. geol. Karte d. Schweiz. N. F.* **10**, *S. 123 bis 266, 1905.* — **M. Lugeon,** *Les grandes nappes de recouvrement des Alpes du Chablais et de la Suisse. Bull. Soc. Géol. de France, 4. Ser.,* **1**, *S. 723 bis 825, 1902.* — **Derselbe,** *Les nappes de recouvrement de la Tatra et l'origine des Klippes des Carpathes. Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.* **39**, *Nr. 146, 1903.* — **E. de Margerie und A. Heim,** *Les dislocations de l'écorce terrestre, 1888.* — **H. Stille,** *Erläuterungen zu Blatt Peckelsheim der Geologischen Karte von Preußen. S. 41 bis 79: Die tektonischen Verhältnisse des östlichen Vorlandes der südlichen Egge. 1908.* — **E. Suess,** *Das Antlitz der Erde, I, S. 142 bis 189, 1885, und IIIb, S. 572 bis 619 und passim. 1909.* — **V. Uhlig,** *Ueber die Tektonik der Karpathen. Sitzber. Ak. d. Wiss. Wien, M.-N. Klasse* **116**, *Abt. I, S. 871 bis 982, 1907.* — **O. Wilckens,** *Wo liegen in den Alpen die Wurzeln der Ueberschiebungsdecken? Geol. Rundschau,* **2**, *S. 314 bis 330, 1911.* — **Derselbe,** *Grundzüge der tektonischen Geologie. 1912.*

O. Wilckens.

Schichtung.

1. Begriff der Schichtung. Die Schichten unserer Erde sind gewissermaßen die Blätter des ehrwürdigen Buches, das die freilich lückenhafte, natürliche Ueberlieferung unserer Erdgeschichte enthält. Mit dem Worte **Schichtung** bezeichnet man die Lagerungsform der Sedimentgesteine, die unter dem Einfluß eines beweglichen

Mediums, wie Wasser oder Luft, der Schwerkraft, gewisser klimatischer Bedingungen und allgemeiner, sehr langsamer (säkularer) Hebungs- und Senkungsvorgänge zustande gekommen ist.

2. Die einzelne Schicht. Die Schichtung bewirkt eine Trennung der Gesteine durch einander nahezu parallele Schichtungsflächen, Schichtflächen, die bei verhältnismäßig geringem Abstand eine große Ausdehnung haben, in platten- oder tafelförmige Lagen oder Schichten (Strata). Jede Schicht ist von der darüber ebenso wie von der darunter liegenden durch eine Fuge, die Schichtfuge, getrennt. Während manche Gesteine sehr leicht in ihre Schichten zerfallen (Letten, Dysodil), sind andere nur schwer in dünne Schichten zu trennen, obwohl sie sehr fein geschichtet sind (mancher Plattendolomit, Rhätsandstein). Wegen ihrer Wasserführung und als natürliche Ablösungsflächen der Gesteine haben Schichtflächen eine große wirtschaftliche und technische Bedeutung (Bergbau, Steinbruchindustrie). Die Schichtflächen sind nur selten nahezu vollkommen eben (Solnhofener lithographischer Schiefer), sondern meist nur annähernd eben oder noch öfter flach gekrümmt (Buntsandstein) oder wellig (Wellenkalk). Die obere Begrenzungsfläche einer Schicht wird als Oberfläche derselben (Dachfläche), die untere als Unterfläche (Sohlfläche) bezeichnet. Der senkrechte Abstand der Ober- und Unterfläche einer Schicht oder ihre Dicke heißt die Mächtigkeit derselben. Diese kann sehr gering sein, so daß sie mit dem bloßen Auge kaum noch wahrzunehmen ist (Tonbestege oder Zwischenmittel in Buntsandstein und Wellenkalk), die Schicht kann aber auch größere Mächtigkeit erreichen und wird dann als Bank bezeichnet. Einzelne solche Bänke bilden in manchen Formationen wahre Leitschichten (Wellenkalk), in anderen liefern sie die Hauptmasse des Gesteins und dieses bricht senkrecht zu den Schichtflächen in große, würfelige Stücke (Quadersandstein, Buntsandstein). Unter einem Flöz versteht man eine technisch nutzbare Schicht (Steinkohle, Kupferschiefer), ebenso unter einem Lager (Kalilager, Eisensteinlager usw.).

Die Verbreitung, d. h. die horizontale Ausdehnung der einzelnen Schichten ist eine sehr verschiedene. Während manche verhältnismäßig geringmächtige Schichten (Kupferschiefer, Lehrbergschicht, Lettenkohlenflöz) auf sehr große Entfernungen hin sich in ihrer Mächtigkeit nahezu gleich bleiben, ändern andere, sehr mächtige Schichten ihre Dicke oft sehr rasch, wie z. B. die Konglomerate des Oberrotliegenden und seine Schiefertone. Wird eine Schicht so schwach, daß sie zwischen der hangenden und liegenden Schicht verschwindet, also ganz aufhört, so sagt man, die Schicht keilt sich aus. Dieses Auskeilen ist eine sehr gewöhnliche Erscheinung, die man besonders im Buntsandstein und im Rotliegenden überall beobachten kann. Keilt sich eine Schicht nur streckenweise aus und erscheint sie nach einiger Unterbrechung von neuem, so spricht man von einem Wiederaufsetzen derselben. Eine Schicht, die nach allen Seiten nach geringer Verbreitung auskeilt, hat eine linsenförmige Lagerung (lentikuläre Einlagerung) z. B. Gips, Steinsalz. Eine plötzliche Unterbrechung einer Schicht findet dann statt, wenn diese in ihrer ganzen Mächtigkeit plötzlich an einer fremden Gesteinsmasse abschneidet. Man nennt diese Erscheinung das Abstoßen oder Abschneiden einer Schicht. Ein solches findet z. B. statt, wenn ein vulkanisches Gestein die Schichten durchbrochen hat (Fig. 1) oder wenn ein Korallen-

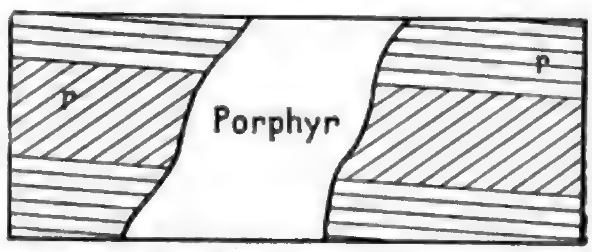


Fig. 1. Abstoßen der Sedimentschichten des Rotliegenden (r) an einem Porphyrgang.

riff die Schichtenreihe durchsetzt. Tritt eine Schicht an der Erdoberfläche zutage, so sagt man, sie steht an der betreffenden Stelle an, und unterscheidet sie damit von allen, durch spätere Vorgänge auf natürlichem (Wasser, Gletscher, Bergsturz) oder auf künstlichem Wege an andere Stelle beförderten Massen. Die Durchschnittsfläche einer Schicht mit der Erdoberfläche ist ihr Ausstrich oder ihr Ausgehendes. Bei dem Ausstreichen von senkrecht (saiger) oder steil stehenden Schichten nennt man das Ausgehende auch die Schichtenköpfe. Die Schichten haben meist noch die ursprüngliche horizontale Lagerung, sie liegen söhlig oder schwebend; in anderen Fällen sind sie durch spätere Bewegungen in der Erdkruste aufgerichtet, gefaltet oder zerrissen. Eine so in geneigte Stellung gebrachte Schicht kann eine sehr verschiedene Lage im Raum haben. Diese Lage wird erstens durch die Durchschnittslinie der Schicht mit der Horizontalebene bestimmt; man nennt diese Linie die Streichlinie und spricht vom Streichen einer Schicht, das mit dem

geologischen Kompaß gemessen wird. Zur erschöpfenden Bestimmung der Lage einer Schicht gehört aber außerdem noch die Angabe ihrer Neigung gegen die Horizontalebene. Man bezeichnet die in der Schicht zur Streichlinie senkrechte Linie als die Falllinie der Schicht und spricht also von ihrem Fallen. Die Beobachtung von Streichen und Fallen ist für den Bergmann wie für den Geologen von der größten Wichtigkeit, besonders wenn es gilt die Lagerung wenig aufgeschlossener Gebiete zu ermitteln.

Das Streichen wird in der Weise ermittelt, daß man die der Nord-Südrichtung parallele Kante der Kompaßplatte am besten mit Hilfe einer am Kompaß angebrachten Libelle horizontal an die Schichtfläche hält oder der in der Schichtfläche gedachten Horizontallinie (a b in Fig. 2) parallel hält und die Gradzahl abliest,

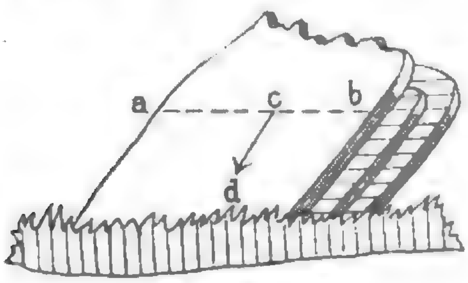


Fig. 2.

um welche sich die Magnetnadel nach ihrer Beruhigung von der Nord-Südrichtung des Kompasses entfernt hat. Je nachdem man dann den Kompaß von der Nord-Südrichtung z. B. um 45° nach Osten oder Westen gedreht hat, bezeichnet man dann das Streichen als N 45 O usw. Der ältere bergmännische Kompaß wird in 2×12 Stunden (horae) geteilt, wobei die Stunden 12 in den Nord- und Südpunkt des Kompasses gelegt werden. Man zählt dann die Stunden von N nach O und von S nach W, so daß die Ost-Westlinie der Stunde 6, die Nordost-Südwestlinie der Stunde 3 und die Nordwest-Südostlinie der Stunde 9 entspricht. Der Deklination oder Ablenkung der Magnetnadel (für Deutschland etwa 13° gegen W) wird in der Weise Rechnung getragen, daß man von dem beobachteten Streichen diese 13° abzieht, falls dasselbe ein im allgemeinen nordöstliches ist, soviel dagegen zuzählt, wenn es nordwestlich ist. Das Fallen bestimmt man seiner Richtung und Größe nach. Zu diesem Zweck achtet man bei Bestimmung des Streichens darauf, nach welcher Richtung das Einfallen der Schichten stattfindet. Die Größe des Fallwinkels oder den Neigungswinkel der Falllinie c d (Fig. 2) gegen den Horizont bestimmt man mittels eines Pendels, das an einer auf dem Boden des Kompasses angebrachten Gradteilung die Größe dieses Winkels anzeigt.

3. Skulptur der Schichtoberfläche. Die Schichtflächen bieten nicht immer das Bild ebener Flächen dar, sondern zeigen oft besondere Skulpturen. Eine sehr häufige Erscheinung sind die Wellenfurchen, durch das Zusammenwirken von Wind und Wasser oder durch den Wind allein entstandene, einander ungefähr parallele Erhöhungen und Vertiefungen, die man besonders am Buntsandstein und an Dünen studieren kann. Mitunter kommen auch zwei oder mehr sich kreuzende Furchensysteme vor. Eine ebenfalls weit verbreitete Skulptur der Schichtoberfläche sind die Trocknungsrisse (Netzleisten). Sie entstehen durch Austrocknung einer frisch gebildeten Schicht und Ausfüllung der dadurch entstandenen Risse durch das Material der nächstfolgenden Schicht. Auch Spuren von Regentropfen als flache runde Vertiefungen sind auf Schichtflächen beobachtet. Ferner finden sich darauf Steinsalzpseudomorphosen, meist etwas verzerrte kleine Würfel, die durch Auslaugung von Steinsalzkristallen und Wiederausfüllung der Hohlräume mit Gesteinsmasse entstanden sind. Seltener zeigen die Schichtflächen Fährtenabdrücke von Tieren (Buntsandstein, Rotliegendes), sehr häufig dagegen sind sie mit zahlreichen Tierresten bedeckt, besonders mit Muschelschalen, deren Innenseite gewöhnlich nach unten gekehrt der Schichtfläche auflagert.

4. Struktur der Schichten. 4a) Plane Parallelstruktur. Die Struktur der geschichteten Gesteine ist gewöhnlich die „plane Parallelstruktur" (C. F. Naumann), d. h. das Gesteinsgefüge zeigt einen mehr oder weniger ausgesprochenen Parallelismus mit der Schichtungsebene. Am besten tritt er bei dünnschichtigen Gesteinen hervor, ist aber auch an dem Wechsel der Färbung oder der Korngröße, an der mit der Schichtungsebene zusammenfallenden Lage von Geröllen, Konkretionen oder Versteinerungen zu erkennen.

4b) Diagonalschichtung. Eine ziemlich häufige Ausnahme von der planen Parallelstruktur ist die „Diagonalschichtung", die besonders bei sandigen Gesteinen vorkommt und darin besteht, daß eine oder mehrere Gesteinsbänke eine Schichtung zeigen, die schräg zur Schichtfuge verläuft (Fig. 3).

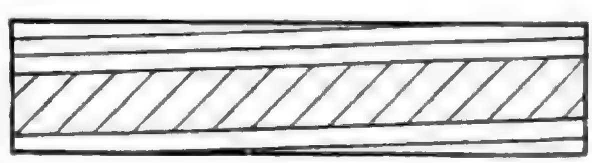


Fig. 3.

4c) Kreuzschichtung. Diskordante Parallelstruktur. Dieser Diagonalschichtung ähnelt vielfach die sogenannte

„Kreuzschichtung" oder „diskordante (ungleichförmige) Parallelstruktur" (Fig. 4), bei der ein häufiger wiederholter und unvermittelter Wechsel der Schichtungsrichtung stattfindet. Sie ist vorzugsweise die Ablagerungsform für lockere Sande und Kiese, also für Fluß- und Deltabildungen,

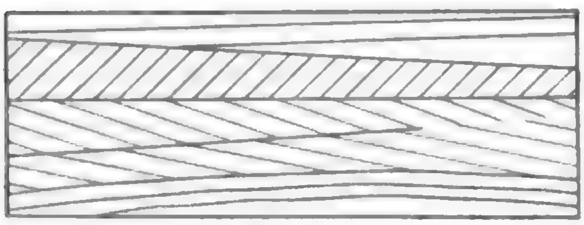


Fig. 4.

sowie für solche der Küstengebiete. Auch ältere diluviale und tertiäre fluviatile Kiese und Sande zeigen diese Struktur sehr häufig und ebenso können die Absätze flacher, küstennaher Meeresteile (rheinischer Koblenzsandstein, Rhätsandstein, deutscher Wellenkalk) infolge des Wechsels der Gezeiten und Strömungen solche Kreuzschichtung sehr schön zeigen. Am bekanntesten, weil am häufigsten, ist diese aber in den Triebsandablagerungen, den Dünen, wo sie durch den häufigen Wechsel in der Richtung der den Sand bewegenden Winde herbeigeführt wird. Auch der Mittlere und Untere Buntsandstein Deutschlands besitzt in großer horizontaler und vertikaler Verbreitung eine sehr ausgeprägte Kreuzschichtung, die von J. G. Bornemann, Joh. Walther und anderen durch Dünenbildung, also durch Windwirkung erklärt worden ist. Diese Kreuzschichtung im Buntsandstein und in anderen Formationen ist für Joh. Walther mit der Grund gewesen, solche Ablagerungen als in einer Wüste entstandene Dünenbildungen zu bezeichnen, während ein Teil dieser Bildungen als limnische Ablagerung zu betrachten ist. Auch im Rotliegenden und im Keuper zeigen die Sandsteine oft sehr schöne Kreuzschichtung. Im Oberrotliegenden Württembergs und Thüringens sind in neuester Zeit auch Windschliffe und Dreikantner gefunden worden, die die festländische Bildungsweise dieser Ablagerungen bekunden.

5. Verbandsverhältnis mehrerer Schichten. Bei Betrachtung mehrerer übereinander liegender Schichten bezeichnet der Bergmann und Geologe die die Decke einer Schicht bildende, unter normalen Verhältnissen jüngere Schicht als deren Hangendes, die unter der betreffenden Schicht lagernde Schicht als deren Liegendes. Mit den Ausdrücken hangend, liegend, im Hangenden, im Liegenden kann also sowohl die einzelne Schicht, wie auch eine ganze Schichtenfolge, das Deck- bezüglich Grundgebirge gemeint sein. Mehrere einander überlagernde, nach Alter und Entstehung zusammengehörige Schichten nennt man eine Schichtenreihe, Schichtenfolge, Schichtengruppe oder einen Schichtenkomplex. Dabei liegen die Schichten gleichförmig oder konkordant, d. h. so wie sie sich eine über der anderen abgelagert haben und ohne daß eine wesentliche Unterbrechung der Schichtenbildung oder eine Störung der Lagerung stattgefunden hat. Die Verknüpfung der einzelnen, ihrer petrographischen Zusammensetzung nach oft sehr voneinander abweichenden Schichten einer solchen Folge kann eine sehr mannigfache sein. Ganz verschiedene Schichten können sehr unvermittelt einander überlagern, es kann aber auch ein unmerklicher Uebergang vom Liegenden zum Hangenden stattfinden, sodaß man nicht recht sagen kann, wo die eine Schicht aufhört und die andere anfängt. So gehen z. B. Sandsteine ganz allmählich in Konglomerate, Mergel in Kalksteine über (Konglomerate und Sandsteine des Rotliegenden, Gneis und Glimmerschiefer). Der Uebergang von einem Gestein zum anderen wird auch oft dadurch herbeigeführt, daß beide Gesteine miteinander wechsellagern. In der älteren Schicht stellen sich hierbei zunächst einzelne dünne Lagen der jüngeren ein, dann folgen mehr solche, so daß die Schicht aus beiden Gesteinsarten gleichmäßig besteht, bis dann die jüngere Gesteinsart vorherrschend wird und schließlich für sich allein die Schicht ausmacht. Diese Wechsellagerung (von Raumer) ist eine sehr häufige Erscheinung (Bänderton, Letten und Sandstein des Buntsandsteins, der Lettenkohle usw.). Wie in der Richtung vom Liegenden zum Hangenden, so kann auch in horizontaler Richtung eine Aenderung des Gesteinsmaterials auftreten (Sandstein in Plänerkalk). In solchen Fällen kann also gleichzeitig an verschiedenen Punkten verschiedenes Material zur Bildung einer gleichaltrigen Schicht abgelagert worden sein. Der seitliche Uebergang von einem Material kann ein ganz allmählicher sein oder die beiden Gesteinsabarten greifen, sich seitlich ausspitzend, zahnförmig ineinander ein. Man nennt diese Schichtenform auskeilende Wechsellagerung oder Verzahnung; sie kann auch für größere Schichtengruppen stattfinden (Oberrotliegendes, unterer Buntsandstein). Endlich kann auch durch zunehmende Konkretionsbildung (C. F. Naumann) in horizontaler oder vertikaler Richtung eine Aenderung des Schichtgesteins eintreten; so treten in einem Ton einzelne Konkretionen von Kalk auf, die sich

allmählich zu einem Kalkstein verdichten. Als eine besondere Art von Schichtung ist noch die sogenannte Uebergußschichtung zu nennen, eine Art steiler, unregelmäßiger Schichtung, bei der schuppenförmig übereinandergreifende auskeilende Schichten von Kalk in flach geneigter Stellung in die umgebenden, klastischen Sedimente hinabtauchen (Joh. Walther). Sie findet sich am Außenrande von fossilen, wie auch von modernen Riffen und ist z. B. an den Bryozoenriffen Ostthüringens gut zu beobachten.

6. Faciesbildung. Wie bei den Formationen kann auch in den Schichtengruppen und sogar in der einzelnen Schicht eine örtliche Verschiedenheit hervortreten, die man als verschiedene Facies bezeichnet. Man versteht also unter verschiedener Facies diejenige örtliche Verschiedenheit in der Ausbildung gleichzeitig gebildeter Schichten, die sich aus deren besonderen Bildungsverhältnissen, also durch lokale Einflüsse erklärt. Solche Einflüsse können durch das verschiedene Klima, durch Meeresströmungen, durch verschiedene Tiefe des Meeres, durch verschiedene Beschaffenheit des Meeresgrundes und anderes bedingt sein. Ebenso können zu Lande die verschiedenartigsten Bildungsbedingungen herrschen, je nachdem die Ablagerungen in Sümpfen, Seen, Flüssen oder durch Wind oder Gletscherwirkung entstehen. Man spricht daher bei Betrachtung verschiedener Facies von terrestrer und mariner Facies und unterscheidet innerhalb der ersteren wiederum eine limnische Facies (Ablagerung in Süßwasserbecken), eine paralische Facies (Ablagerungen in flachen Küstenländern), eine äolische und fluviatile Facies; innerhalb der marinen Facies unterscheidet man eine litorale Flachwasser- und eine pelagische Tiefseebildung. Besonders schöne Beispiele für verschiedene Faciesverhältnisse bietet die Karbonformation Amerikas und die europäische Steinkohlenformation. So ist die europäische produktive Kohlenformation eine typische terrestre Bildung, der Kulm die zugehörige Litoralbildung und der Kohlenkalk die marine Facies. Noch viel mannigfaltiger sind die Faciesunterschiede in der Trias und im Tertiär, die zu einer weitgehenden Verschiedenartigkeit benachbarter Faunen und Sedimente geführt haben.

7. Entstehung der Schichtung. Für die Entstehung der Schichtung gab man früher die Erklärung, daß jede Schichtfläche eine zeitweilige Unterbrechung des Sedimentabsatzes bedeute (Mohs, Studer, C. F. Naumann u. a.). In neuerer Zeit hat sich besonders Johannes Walther in größerem Umfange mit dieser Frage beschäftigt und tritt dieser Ansicht entgegen, indem er sagt: „Eine konkordante Schichtenfuge bedeutet nicht eine zeitliche Unterbrechung, sondern nur eine qualitative Veränderung der Bildungsumstände einer Ablagerung, ein Wandern der Facies, eine Umgestaltung der Bedingungen, welche eine Ablagerung bildeten." Jeder Mangel einer Schichtung ist also gleichbedeutend mit der Unveränderlichkeit der Bildungsumstände. Jede direkt entstandene Schichtenfuge entspricht nach Walther einem Wandern der Facies, und je rascher die Schichtenfugen aufeinanderfolgen, desto häufiger wechselten die Bildungsverhältnisse einer Ablagerung. Wenn J. Walther so das Wesen der Schichtung erschöpfend erklärt hat, so bleibt doch noch die Frage zu beantworten, welches dann die lithogenetischen Bedingungen oder Bildungsumstände waren, die eine bestimmte Schicht entstehen ließen.

Für diese Frage sind die Ergebnisse der deutschen Südpolarexpedition von besonderer Wichtigkeit, über die E. Philippi berichtet hat. Es hat sich herausgestellt, daß nicht nur einzelne Grundproben, die dem Meeresboden entnommen waren, Schichtung zeigten, sondern daß die Schichtung ein allgemein verbreitetes Phänomen ist, ihr Fehlen aber nur ausnahmsweise zu verzeichnen ist, wobei außerdem meist große Mächtigkeit der Schichten die Ursache des scheinbaren Fehlens bildet. Nach Philippi beruht die Schichtung moderner Sedimente teilweise auf einer Veränderung wichtiger klimatischer Faktoren, teilweise auf Krustenbewegungen (vgl. den Artikel „Gebirgsbildung"), während andere Ursachen nicht vorhanden zu sein scheinen. Für die fossilen Schichten bleibt nun noch festzustellen, welche der beiden Ursachen in jedem einzelnen Falle vorliegt. Unter ihnen sollen nach Philippi besonders die in Geosynklinalen (vgl. den Artikel „Gebirgsbildung") gebildeten Gesteine der südfranzösischen Kreide und des alpinen Flysch (vgl. den Artikel „Formationen") ihre besonders regelmäßige Schichtung Krustenbewegungen verdanken. Die äußerst regelmäßige Aufeinanderfolge oft gleich dicker Schichten soll hier auf eine Periodizität des Senkungsvorganges hindeuten, der die Bildung von Geosynklinalen herbeiführt. Weitere ozeanographische Arbeiten werden vielleicht in Zukunft lehren, welches die Ursachen der Krustenbewegungen sind und welches deren Länge ist, so daß es möglich sein würde, die Zeit, in der sich eine bestimmte Schicht bildet, in absolutem Maße zu bestimmen.

Literatur. ***Fr. Mohs,*** *Die ersten Begriffe der Mineralogie und Geognosie für junge, praktische Bergleute der k. k. österreichischen Staaten, Teil II, S. 128. Wien 1842.* — ***B. Studer,*** *Lehrbuch der physikalischen Geographie und Geologie,*

S. 132, 1844. — **C. F. Naumann,** *Lehrbuch der Geognosie, II. Aufl., Bd. I., S. 457 bis 476. Leipzig 1858.* — **Delesse,** *Lithologie du fond des mers. Paris 1866.* — **L. F. v. Pourtalès,** *Der Boden des Golfstroms. Petermanns Mitteilungen, S. 393, 1870.* — **Fr. Pfaff,** *Allgemeine Geologie, 1893.* — **F. v. Richthofen,** *China, I, 1877.* — **C. W. v. Guembel,** *Sitzungsber. bayer. Akad., II. S. 189, 1878.* — **Th. Fuchs,** *N. Jahrb. f. Min. usw. Beilageband II, S. 487, 1883.* — **J. Murray und A. F. Renard,** *Les caractères microscopiques des cendres volcaniques et des poussières cosmiques et leur rôle dans les sédiments de mer profonde. Bull. mus. roy. d'hist. nat. Belg., III, 1884.* — **E. Kalkowsky,** *Elemente der Geologie, 1886.* — **K. v. Fritsch,** *Allgemeine Geologie, 1888.* — **C. W. v. Guembel,** *Geologie von Bayern, 1888.* — **J. Murray und Renard,** *Deep Sea Deposits in Reports of the scientific results of the Voyage of H. M. S. „Challenger". London 1891.* — **W. Frantzen,** *Untersuchungen über die Diagonalstruktur. Jahrb. d. Kgl. Preuß. Geol. L. A., S. 138, 1892.* — **Joh. Walther,** *Lithogenesis der Gegenwart. Dritter Teil einer Einleitung in die Geologie, S. 620 bis 641, Jena 1894.* — **Thoulet,** *L'Océan. Paris 1904.* — **Em. Kaiser,** *Lehrbuch der Geologie. Teil I. Allgemeine Geologie. Stuttgart 1905.* — **O. Krümmel,** *Handbuch der Ozeanographie, I, 2. Aufl., 1907.* — **Haug,** *Traité de Géologie, I. Paris 1907.* — **K. Andrée,** *Ueber stetige und unterbrochene Meeressedimentation usw. N. Jahrb. f. Min., Beil. Bd.* **25**, *S. 366.* — **E. Philippi,** *Ueber das Problem der Schichtung und über Schichtenbildung am Boden der heutigen Meere. Zeitschr. der deutsch. geol. Gesellsch., Bd.* **60**, *S. 346 bis 377, 1908.* — **G. Linck,** *Ueber die Bildung der Kalksteine. Naturw. Wochenschr.* **24**, *S. 689 bis 694, 1909.* — **K. Andrée,** *Ueber Sedimentbildung am Meeresboden. Mit Literatur von 1841 bis 1911. Geologische Rundschau, Band* **3**, *Heft 5/6, S. 324 bis 360.*

E. Naumann.

Schieferung.

Ein durch einseitige Pressung (Streß) hervorgebrachte und stets senkrecht zur Druckrichtung liegende Teilbarkeit der Gesteine. Die Schieferung liegt bald der Schichtung parallel, bald schräg zu ihr (Diagonalschieferung), bald senkrecht dazu (Transversalschieferung). Man vergleiche den Artikel „Mineral- und Gesteinsbildung durch Metamorphose".

Schilfsandstein.

Ein dem mittleren Keuper Schwabens angehöriger Sandstein mit schilfähnlichen Pflanzenabdrücken (vgl den Artikel „Triasformation").

Schimper

Andreas Franz Wilhelm.

Geboren am 12. Mai 1856 zu Straßburg als Sohn Wilhelm Philipp Schimpers. Er studierte von 1874 ab in Straßburg Naturwissenschaften und promovierte 1878. Nach vorübergehendem Aufenthalt in Lyon als Assistent ging er 1880 nach Nordamerika, wo er ein Jahr lang als Fellow an der John Hopkins Universität in Baltimore tätig war. Nachdem er von dort Florida und Westindien kurz besucht hatte, kehrte er 1882 zurück und begab sich nach Bonn, um jedoch im selben Jahre mit Johow wiederum Westindien zu besuchen. Nach seiner Rückkehr, 1883, habilitierte er sich in Bonn als Privatdozent für Botanik und wurde 1886 ebendort außerordentlicher Professor. Er bereiste noch 1886 Brasilien sowie 1889 bis 1890 Ceylon und Java und nahm 1898 bis 1899 an der Deutschen Tiefsee-Expedition teil. Nach der Rückkehr trat er die ihm inzwischen übertragene ordentliche Professur in Basel an und starb am 9. September 1901 daselbst. Unter seinen Arbeiten sind u. a. zu nennen diejenigen über Stärkekörner, über deren Bildung und Wachstum er neue wichtige Aufschlüsse gab (1881 bis 1883). Am bekanntesten wurden die durch seine Reisen angeregten biologischen („Die epiphytische Vegetation Amerikas", „Die Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Ameisen im tropischen Amerika", beide Jena 1888, „Die indomalayische Strandflora", ebendort 1891) und pflanzengeographischen Arbeiten von denen die „Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage" (Jena 1898) die umfassendste und wichtigste ist.

Literatur. **Schenck,** *in den Berichten der Deutschen Botanischen Gesellschaft, Bd.* **19**, *1901, S. 54 bis 70.*

W. Ruhland.

Schimper

Karl Friedrich.

Geboren am 15. Februar 1803 in Mannheim als Sohn eines Bruders von Wilhelm Philipp Schimper. Er studierte zunächst von 1822 ab in Heidelberg Theologie, trat aber schon 1824 als Pflanzensammler eine zweijährige Reise nach Südfrankreich an; darauf begann er wiederum in Heidelberg, jetzt jedoch Medizin, zu studieren. 1828 ging er nach München, wo er bis 1842 lebte, zeitweise als akademischer Dozent tätig, zeitweise auf wissenschaftlichen Reisen in den Alpen, Pyrenäen usw., zu denen er vom Könige und dem Kronprinzen von Bayern die Mittel erhielt. Darauf siedelte er nach Mannheim und 1849 von dort nach Schwetzingen über. Eine amtliche Tätigkeit übte er nicht mehr aus. In seinen späteren Jahren wurde er durch eine Pension des Großherzogs von Baden unterstützt. Er starb am 21. Dezember 1868.

Seine bedeutendste wissenschaftliche Leistung ist in der Abhandlung „Beschreibung des

Symphytum Zeyheri usw." (Geigers Magazin für Pharmazie, Bd. 28, Heidelberg 1835) niedergelegt, wo die Blattstellungslehre begründet und ausgebaut wird, allerdings unter Zugrundelegung einer irrigen Annahme vom Wachstum des Stengels und der Blätter. Außerdem hat er wichtige Arbeiten (Mannheim 1843) über die Eiszeit geliefert.

Literatur. *W. Hofmeister, in der Botanischen Zeitung, Bd.* **26**, *1868, S. 33 bis 40.*

W. Ruhland.

Schimper

Wilhelm Philipp.

Geboren am 12. Januar 1808 zu Dosenheim (Unter-Elsaß). Er studierte in Straßburg von 1826 bis 1828 Philosophie, Philologie und Mathematik, dann bis 1832 Theologie. Nachdem er als Erzieher tätig gewesen war, wurde er 1835 Aide-naturaliste und 1838 Konservator an der geologischen Abteilung des Naturhistorischen Museums, zu dessen Direktor er 1866 aufrückte. Seit 1862 wirkte er auch als Professor der Geologie an der Universität. 1879 trat er in den Ruhestand und starb am 20. März 1880 in Straßburg. Er hat sich als Paläontologe und vor allem als Bryologe hervorgetan. Erwähnt seien die „Monographie des plantes fossiles du grès bigarré de la chaine des Vosges" (Leipzig 1844, mit Mougot), die „Bryologia europaea" (6 Bde., Stuttgart 1836 bis 1855, mit Bruch und Gümbel), die „Recherches anatomiques et morphologiques sur les Mousses" (Straßburg 1850), die „Synopsis Muscorum Europaeorum" (2 Bde., Stuttgart 1860, 2. Aufl. 1876) und der „Traité de paléontologie végetale" (2 Bde., Paris 1869 bis 1874).

Literatur. *De Bary, in der Botanischen Zeitung, Bd.* **38**, *S. 441 bis 450.*

W. Ruhland.

Schlaf.

I. Symptomatologie des Schlafes. 1. Die subjektiven Symptome. 2. Die objektiven Symptome. II. Aeltere Theorien des Schlafes. 1. Die Zirkulationstheorien. 2. Die Ermüdungstheorien. 3. Die histologische Theorie. 4. Psychologische Theorien. 5. Die biologische Theorie. III. Analyse des Schlafvorgangs. 1. Die Bedingungen für den Eintritt des Schlafes: a) Die äußeren Bedingungen. b) Die inneren Bedingungen. 2. Die Vorgänge während des Schlafes. 3. Die Bedingungen des Erwachens. IV. Die Unterschiede des Schlafes von anderen Zuständen der Bewußtlosigkeit. 1. Der Winterschlaf. 2. Die Narkose. 3. Die Hypnose. V. Der Traum. 1. Der Traum als partieller Wachzustand. 2. Die Genese des Traumes. 3. Die Traumperiode des Schlafes. 4. Der Inhalt der Träume. 5. Der ataktische Charakter der Träume.

I. Symptomatologie des Schlafes.

Der Schlaf ist ein Zustand relativer Ruhe, der in rhythmischer Folge mit dem Zustande relativer Tätigkeit, d. h. dem Wachzustande wechselt. Der Rhythmus ist dabei bedingt durch den rhythmischen Wechsel der Tageszeiten. Die physiologische Bedeutung des Schlafes ergibt sich aus der Tatsache, daß Mangel an Schlaf den Organismus außerordentlich schädigt und daß künstliche Verhinderung des Schlafes schließlich zum Tode führt. Seiner großen physiologischen Bedeutung entspricht die Länge der Zeit, die der Schlaf im Leben beansprucht. Der Mensch schläft durchschnittlich mehr als den dritten Teil seines Lebens. Im mittleren Lebensalter beträgt die tägliche Durchschnittsdauer des Schlafes etwa 8 Stunden. In den ersten Jahren der Kindheit ist die tägliche Dauer des Schlafes ganz bedeutend länger, bis zu 18 Stunden. Sie nimmt allmählich ab bis der erwachsene Zustand erreicht ist. Im weiteren Verlauf des Lebens bleibt sie dann ziemlich konstant bis zum hohen Alter und nimmt erst bei sehr alten Leuten gewöhnlich wieder weiter ab. Der wichtigen physiologischen Rolle des Schlafes aber entspricht in keiner Weise die Aufmerksamkeit, welche die physiologische Forschung diesem Zustande gewidmet hat. Die Untersuchungen über die Vorgänge im Organismus während des Schlafes und über das Verhalten der verschiedenen Organfunktionen gegenüber dem Wachzustande stammen zum überwiegenden Teile aus älterer Zeit und sind vielfach dringend einer kritischen Nachprüfung mit moderneren Methoden bedürftig. Die neuere Physiologie hat nur spärliche Beiträge zur Physiologie des Schlafes geliefert, und diese sind auch nur in geringem Umfange ergänzt worden durch die Beobachtungen der Kliniker.

Wenn man die Veränderungen überblickt, die der Organismus während des Schlafes gegenüber dem Wachzustande in seinen Funktionen erkennen läßt, kann man subjektive und objektive Symptome des Schlafes unterscheiden.

1. Die subjektiven Symptome des Schlafes. Das wichtigste und (aus der Selbstbeobachtung) allgemein bekannte subjektive Symptom ist das Aufhören der Bewußtseinsprozesse im Schlaf. Im ungestörten Schlaf spielen sich keine Bewußtseinsprozesse ab. Die Bewußtseinsvorgänge, die im Schlafe beobachtet werden, die Träume, sind partielle Unterbrechungen des Schlafes, nicht Symptome desselben. Der Ausfall der Bewußtseinsvorgänge im Schlaf begründet aber keineswegs eine Identifizierung des Schlafes mit anderen Zuständen, in denen ebenfalls das Symptom des Aufhörens der Bewußtseinsvorgänge vorhanden ist. Dieses subjektive Symptom erscheint vielmehr bei sehr verschiedenartigen

Zuständen und es ist die Aufgabe einer genaueren Analyse des Schlafes, die spezifischen Vorgänge zu ermitteln, die gerade beim Schlaf zur Entwickelung dieses Symptoms führen.

2. Die objektiven Symptome des Schlafes. Die objektiven Symptome des Schlafes sind zahlreich. Sie bestehen allgemein in einer Herabsetzung der Tätigkeit einzelner Organe, vor allem des Nervensystems und solcher Organe, die von ihm direkt abhängig sind.

Was zunächst das Nervensystem betrifft, so ist besonders wichtig der Zustand der Großhirnrinde.

Die Sphären der Großhirnrinde befinden sich während des Schlafes im Zustande eingeschränkter Tätigkeit und herabgesetzter Erregbarkeit. Das motorische Rindengebiet ruht, d. h. es entsendet keine Impulse zu den motorischen Erfolgsorganen. Willkürliche Bewegungen fehlen im ungestörten Schlaf. Die sensorischen Rindengebiete ruhen ebenfalls und zeigen einen Zustand herabgesetzter Erregbarkeit. Die Erregbarkeitsverhältnisse der sensorischen Rindengebiete sind mehrfach Gegenstand experimenteller Untersuchungen am Menschen gewesen. Man hat für verschiedene Sinnesgebiete, besonders Gehörssinn, Gesichtssinn und Drucksinn die Reizschwellen festzustellen gesucht, bei denen die Reizintensität eben genügt, um Erwachen hervorzubringen. Diese Untersuchungen haben begreiflicherweise mit vielen Fehlerquellen zu arbeiten und ihre Ergebnisse dürfen daher keinen Anspruch auf vollkommene Genauigkeit erheben. Trotzdem aber haben sie doch genügend zuverlässiges Material geliefert, um eine Tatsache von Wichtigkeit einwandfrei erkennen zu lassen, das ist die Gesetzmäßigkeit in der Veränderung der Erregbarkeit der Sinnesgebiete während des Verlaufes eines normalen Schlafes. Besonders die sehr eingehenden Untersuchungen von Kohlschütter mit dem Fechnerschen Schallpendel, dann die Beobachtungen von Mönninghoff und Piesbergen, von Michelson, von Lambranzi u. a. haben gezeigt, daß die Erregbarkeit der Sinnessphäre vom Sinnesorgan aus beim normalen Schlaf ihren niedrigsten Grad erreicht innerhalb der ersten bis zweiten Stunde nach dem Einschlafen, daß dann die Erregbarkeit wieder ansteigt und zwar anfangs ziemlich schnell, dann immer langsamer. Nimmt man also den Erregbarkeitsgrad der Sinnessphären als Maßstab für die Tiefe des Schlafes, dann hat der Schlaf die größte Tiefe innerhalb der ersten bis zweiten Stunde nach dem Einschlafen. Nach Erreichung seiner größten Tiefe wird er schnell wieder flacher und bleibt sehr flach während der ganzen zweiten Hälfte seiner Dauer. Die beistehende Kurve (Fig. 1) zeigt dieses Verhältnis genauer. Die Angabe einiger Beobachter, daß der Schlaf in der zweiten Hälfte seiner Dauer eine zweite Vertiefung erfährt, die aber bedeutend geringer ist als die erste, bedarf noch einer genauen Nachprüfung. Wahrscheinlich handelt es sich bei diesen Beobachtungen nicht um Verhältnisse des normalen Schlafes, sondern um

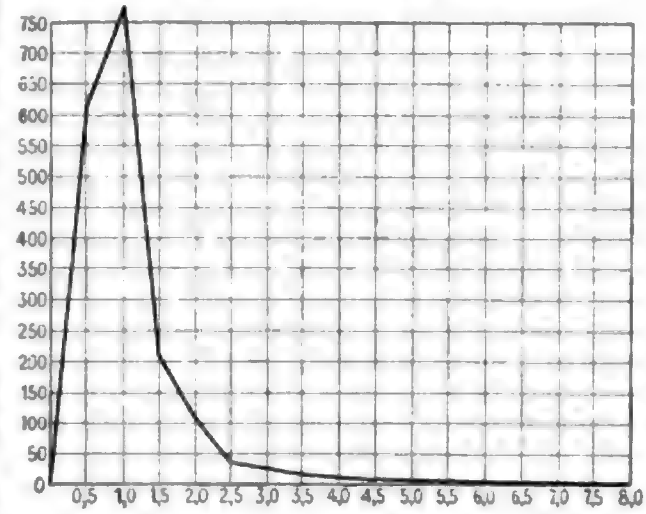


Fig. 1. Kurve der Tiefe des Schlafes. Die Abszisse gibt die Zeit in halben Stunden, die Ordinaten geben die Schwellenwerte für Schallreize an. Nach Kohlschütter.

pathologische Zustände. Unter pathologischen Verhältnissen kann die Kurve der Schlaftiefe sehr unregelmäßige Formen annehmen. Dagegen zeigt sich bei gesunden Individuen stets der gleiche Typus der Kurve auch dann, wenn durch Muskelarbeit eine stärkere Ermüdung oder durch Alkoholgenuß eine leichte Narkose gegeben ist. Wenn man den Wiederanstieg der Erregbarkeit nach dem Ende der ersten Stunde als einen Indikator für die erholende Wirkung des Schlafes betrachtet, dann hat in gewissem Sinne die alte Anschauung, daß der Schlaf vor Mitternacht der wertvollste ist, eine gewisse physiologische Berechtigung, nämlich in dem Falle, daß der Mensch um 9 oder 10 Uhr zu Bett geht. Im übrigen hat die erholende Wirkung nichts mit der Tages- oder Nachtstunde an sich zu tun, außer wenn am Tage die Reize, wie Licht, Geräusche usw. in größerem Umfange bis in das Schlafzimmer dringen können als während der Nacht. Ist das nicht der Fall, dann verschiebt sich mit dem Zeitpunkt des Schlafengehens lediglich die Kurve auf eine andere Zeitperiode, ohne ihren Charakter zu ändern, vorausgesetzt, daß erst die Zeit des Uebergangs von der einen Lebensweise zur anderen überwunden ist. So ist es z. B. lediglich Gewohnheitssache, ob man früh schlafen geht und früh aufsteht oder spät schlafen geht und spät aufsteht. Die beiden extremen Typen geistiger Arbeiter, von denen der eine abends spät, in die Nacht hinein, der andere sehr früh morgens arbeitet, sind nicht in der physiologischen Organisation des Individuums, sondern lediglich in der Gewohnheit begründet und können ohne Schwierigkeit nach kurzer Umgewöhnung ineinander umgekehrt werden.

Physiologisch vorteilhafter allerdings ist die Gewohnheit, im Beginn der Wachperiode zu arbeiten als am Ende der Wachperiode, weil im ersteren Falle die Großhirnrinde relativ erholt, im letzteren relativ ermüdet ist.

Auch die tiefer gelegenen Centra des Gehirns, z. B. der Medulla oblongata, zeigen während des Schlafes eine Herabsetzung ihrer Tätigkeit oder Erregbarkeit. So ist z. B. die Tätigkeit des Atemzentrums, wie das Verhalten der Atembewegungen erkennen läßt, während des Schlafes in charakteristischer Weise verändert. Die Atmung, die während des Wachseins beim Menschen ziemlich unregelmäßig ist und in ihrer rhythmischen Folge von Inspirations- und Exspirationsbewegungen fortwährend Störungen zeigt, wird im Schlafe regelmäßig und gleichförmig. Dabei wird die Frequenz der Atemimpulse geringer, während gleichzeitig die Tiefe der Atemzüge zunimmt. Auf die Exspiration, die sich unmittelbar dem Gipfel der Inspiration anschließt, folgt jedesmal eine längere Pause, die so lang werden kann, wie Inspirations- und Exspirationsphase zusammen genommen. Die Erregbarkeit anderer Centra der Medulla oblongata ist ebenfalls herabgesetzt, wie das Verhalten der Pupillarreflexe zeigt.

In gleicher Weise sind Angaben gemacht worden über die Verminderung der Reflexerregbarkeit des Rückenmarks. Die Sehnenreflexe, der Cremasterreflex, die Gefäßreflexe sind herabgesetzt und es bedarf stärkerer Reize, um sie hervorzurufen. Dagegen ist z. B. der reflektorische Tonus der Centra für die Sphincterenmuskeln der Blase und des Mastdarms nicht nachweisbar vermindert. Diese Centra des Rückenmarks und zweifellos noch manche andere schlafen also nicht.

Die vom Nervensystem abhängigen Organe befinden sich im Zustande relativer Ruhe. Die Skelettmuskeln sind im ungestörten Schlaf zum größten Teile erschlafft, wenn auch im einzelnen entsprechend der Lage des Körpers eine gewisse tonische Erregung bestehen kann. Alle umfangreicheren Skelettmuskelbewegungen während des Schlafes aber sind schon nicht mehr Symptome, sondern partielle Unterbrechungen des Schlafes. Die Herztätigkeit ist während des ruhigen Schlafes in ihrer Frequenz etwas verlangsamt. Auch die sekretorischen Prozesse sind vermindert. Die Speichelsekretion, die Sekretion der Nasenschleimhaut, die Tränensekretion und selbst die Harnsekretion ist vermindert. Katarrhalische Sekretionen nehmen im tiefen Schlaf an Intensität ab. Eine Herabsetzung in der Tätigkeit der Verdauungsdrüsen dagegen konnte Pawlow während des Schlafes nicht beobachten. Indessen bedürfen alle die genannten Angaben über die Tätigkeit der Drüsen im Schlaf noch genauerer Nachprüfung.

Der Gesamtstoffwechsel des Körpers ist im Schlaf stark eingeschränkt. Wie schon Scharling, Pettenkofer und Voit, Saint-Martin u. a. gezeigt haben, ist der Sauerstoffverbrauch und die Kohlensäureproduktion im Schlaf viel geringer als im Wachzustand. Das ist von vornherein zu erwarten, da ja große Organmassen, wie z. B. die Muskeln, während des Schlafes ruhen und daher einen geringeren Stoffumsatz haben als bei gesteigerter Tätigkeit.

Mit diesen Veränderungen gegenüber dem Wachzustand ist aber die Symptomatologie des Schlafes keineswegs erschöpft. Die letztere wird vielmehr durch weitere Untersuchungen noch wesentlich vervollständigt werden. Indessen läßt sich doch schon aus dem vorliegenden Material erkennen, daß nicht der ganze Körper am Schlafe in gleichmäßiger Weise beteiligt ist. Der Zustand der Ruhe oder der verminderten Tätigkeit und Erregbarkeit betrifft nur bestimmte Organe. Andere Teile des Körpers zeigen keine Veränderung gegenüber dem Wachzustande. Ferner, während die Herabsetzung der Tätigkeit gewisser Teile eine primäre ist, ist die Ruhe anderer nur eine sekundäre. Primär schlafen nur bestimmte Teile des Nervensystems und speziell scheint die Tätigkeit der Großhirnrinde am stärksten herabgesetzt zu sein. Sekundär schläft z. B. die große Hauptmasse der Skelettmuskeln, wie diese Organe ja auch nur sekundär, d. h. immer nur auf Impulse von seiten des Nervensystems hin tätig sind. Jede Theorie des Schlafes würde also in erster Linie die Aufgabe haben, den Ruhezustand des Nervensystems und zwar besonders der Großhirnrinde verständlich zu machen.

II. Aeltere Theorien des Schlafes.

Die Physiologie des 19. Jahrhunderts hat eine ganze Anzahl sehr verschiedenartiger Theorien über das Wesen des Schlafes hervorgebracht, die zum Teil nur gelegentlich in Form von Vermutungen und Möglichkeiten geäußert, zum Teil aber auch durch Heranziehung von Erfahrungstatsachen zu umfassenderen Lehren ausgearbeitet worden sind. Keine dieser Theorien aber hat vermocht, sich allgemeine Anerkennung zu verschaffen. Ihr gemeinsamer Fehler lag darin, daß man wie bei so vielen komplizierten Vorgängen in der Physiologie bestrebt war, „die Ursache" des Vorgangs zu finden, statt seine einzelnen Bedingungen möglichst eingehend kennen zu lernen. Dieses Suchen nach „der Ursache" des Schlafes hat daher dazu geführt, daß man immer nur einen einzigen Faktor für die Erklärung des Schlafes heranzog und so in eine Einseitigkeit verfiel, die dem komplexen Vorgang nicht gerecht werden konnte.

1. Die Zirkulationstheorien des Schlafes. Eine ganze Gruppe von Theorien hat als gemeinsames Prinzip für die Erklärung des Schlafes Veränderungen in der Blutzirkulation des Gehirns, speziell des Großhirns verwendet. Diese Theorien gingen von den Erfahrungen aus, die man über die Beziehungen zwischen dem Eintritt von Bewußtlosigkeit und Störungen in der Blutversorgung des Gehirns gemacht hatte, wie sie z. B. bei Ohnmachten beobachtet wurden. Man wußte, daß eine Anämie des Gehirns, ja selbst nur eine kurzdauernde oder relativ geringe Verminderung der Blutzufuhr zum Gehirn, sehr schnell von einem Aufhören der Bewußtseinstätigkeit gefolgt ist und man suchte diese Tatsache ohne weiteres für die Theorie des Schlafes nutzbar zu machen.

In diese Kategorie von Theorien gehört schon eine Vorstellung, die Purkinje, allerdings nur als eine zu prüfende Möglichkeit, geäußert hat. Er stellte sich vor, daß die Bewußtseinstätigkeit der Großhirnrinde sich nur in intakter Weise abspielen kann, wenn die Leitungswege zwischen ihr und den tiefer gelegenen Teilen des Zentralnervensystems und den Sinnesorganen vollkommen gangbar sind. Diese Leitungswege sah er in den Stabkranzfasern. Er dachte nun an die Möglichkeit, daß beim Schlaf die gefäßreichen großen Ganglien des Gehirns durch Ueberfüllung mit Blut so an Volumen zunehmen könnten, daß sie die Fasern des Stabkranzes komprimierten und auf diese Weise unwegsam machten, so daß die Bewußtseinstätigkeit der Großhirnrinde infolge dieser Unterbrechung aufhören würde.

Eine andere Form der zirkulatorischen Theorien dachte an eine direkte Anämie der Gehirnrinde. Man suchte beim Schlaf eine Verengerung der Gefäße in der Hirnrinde zu konstatieren. Donders hat in der Tat bei trepanierten Tieren im Schlaf eine Verengerung der kleinen Gehirnarterien beobachtet. Demgegenüber haben Beobachtungen an trepanierten Menschen im Beginn des Schlafes eine Erweiterung der Gehirngefäße gezeigt, so namentlich die Untersuchungen von Rummo und Ferranini, Czerny und Brodmann. Ein konstantes Verhalten der Gehirngefäßweite während des Schlafes ist bisher noch nicht festzustellen gewesen.

2. Die Ermüdungstheorien. Eine zweite Gruppe von Theorien sucht die „Ursache" des Schlafes in der Ermüdung, welcher die Ganglienzellen der Großhirnrinde während des Wachzustandes durch ihre andauernde Tätigkeit unterliegen. Wir wissen, daß die Ermüdung der lebendigen Substanz allgemein charakterisiert ist durch eine Herabsetzung ihrer Erregbarkeit.

Seit den Studien Rankes und später Mossos über die Genese dieser Erregbarkeitsherabsetzung oder Arbeitslähmung bei der Muskelermüdung wird speziell der Anhäufung gewisser Stoffwechselprodukte bei andauernder Tätigkeit eine große Bedeutung in dieser Hinsicht beigelegt. Preyer und Obersteiner haben daher auch die Ursache des Schlafes in der Anhäufung solcher „Ermüdungsstoffe" in den Ganglienzellen der Großhirnrinde gesucht. Preyer dachte dabei speziell an Milchsäure, die in der Tat seit Du Bois-Reymonds Untersuchungen über die Säurebildung im tätigen Muskel als ein typischer Ermüdungsstoff bekannt ist, der tatsächlich auch lähmende Wirkungen ausübt. Versuche, durch Einführung von Milchsäurepräparaten in den Körper Schlaf zu erzeugen, haben aber zu keinem eindeutigen Ergebnis geführt.

Raphael Dubois sieht die Ursache des Schlafes in der Anhäufung von Kohlensäure bei verminderter Tätigkeit nicht des Gehirns allein, sondern des ganzen Körpers, vor allem bei Verlangsamung der Respiration und Herztätigkeit. Er kommt zu diesem Ergebnis durch Identifizierung des täglichen gewöhnlichen Schlafes mit dem Winterschlaf, den er als eine Autonarkose durch Kohlensäure auffaßt, weil er während desselben eine Vermehrung des Kohlensäuregehalts im Blut beobachtet hat. Andererseits aber sieht Dubois auch wieder in der weiteren Anhäufung von Kohlensäure den Reiz zum Erwachen. Die Theorie Dubois ist daher etwas unklar und stützt sich auf eine Identität von zwei Zuständen, die keine engere Beziehung zueinander haben.

Pflüger hat bei der Genese der Erregbarkeitsherabsetzung durch Ermüdung den Schwerpunkt in die allmähliche Erschöpfung des zerfallsfähigen Materials gelegt und folgende Theorie des Schlafes geäußert. Infolge der Einwirkung der äußeren Reize erfolgen in den Ganglienzellen der Großhirnrinde andauernd kleine Explosionen, bei denen Kohlensäure gebildet wird. Die Entstehung der Kohlensäure gibt wieder den Reizanstoß für weitere Explosionen usw. Diese Vorgänge charakterisieren den Wachzustand. Allmählich wird durch die fortdauernden kleinen Explosionen das zerfallsfähige Material der Ganglienzellen mehr und mehr aufgebraucht. Es nimmt also auch der Umfang des Zerfalls mehr und mehr ab. Ist das bis zu einem gewissen Grade geschehen, so ist die Erregbarkeit herabgesetzt und es ist der Zustand erreicht, den wir als Schlaf bezeichnen. Während der Zerfall sich mehr und mehr einschränkt, nimmt auch die Kohlensäurebildung mehr und mehr ab, d. h. die Reizanstöße werden geringer und seltener und so kann sich während des Schlafes die lebendige Substanz restituieren, so daß sich wieder mehr und mehr zerfallfähiges Material anhäuft. Ist dieses wiederum bis zu einem gewissen Grade erfolgt, so tritt das Erwachen ein und der Turnus beginnt von neuem. Diese Theorie

Pflügers sucht also den Schlaf aus den allgemeinen Vorgängen in der lebendigen Substanz, wie sie sich unter dem Einfluß der Reize abspielen, herzuleiten, und in diesem Bestreben liegt ein großer Fortschritt.

3. Die histologische Theorie des Schlafes. Eine Theorie, die ebenfalls an die histologischen Elemente der Großhirnrinde anknüpft, ist die von Mathias Duval aufgestellte „Théorie histologique du sommeil". Ihr Urheber glaubte im Anschluß an die Beobachtung von histologischen Bildern, die mit der Golgischen Imprägnationsmethode von Ganglienzellen gewonnen wurden, daß die Dendriten der Ganglienzellen retraktil wären, in ähnlicher, wenn auch nicht so vollkommener Weise wie die Pseudopodien von Rhizopoden. Er stellte sich daher vor, daß wie bei den Rhizopoden die Pseudopodien, so auch bei den Neuronen durch die Reize des Tages diese Dendriten mehr und mehr zur Retraktion gebracht würden, so daß der Kontaktzusammenhang, den die Kontiguitätstheorie zwischen den Neuronen annahm, auf diese Weise unterbrochen würde. Dadurch entstände eine Unterbrechung des Assoziationslebens und das Bewußtsein erlösche. Auf den ersten Blick hat diese einfache Auffassung des Bewußtseinsausfalls beim Einschlafen, die sich auf dem Papier durch Zeichnungen so anschaulich machen läßt, zahlreiche Forscher bestochen und es wurden außer dem Schlaf auch andere Zustände, wie die nervösen Hemmungen, die Narkose, die Hypnose usw. aus demselben Prinzip hergeleitet. Allein die späteren histologischen Erfahrungen haben die der ganzen Theorie zugrunde liegende Annahme der „Plastizität" der Neurone als einen Irrtum nachgewiesen. Ferner ergaben sich aus dieser Theorie des Schlafes völlig unhaltbare Konsequenzen. Wenn die Reize des Tages die Dendriten der Neurone zur Retraktion bringen, dann könnte der Zeitpunkt des Einschlafens nicht willkürlich hinausgeschoben werden und ein schlafender Mensch würde durch Reize nicht erweckt, sondern nur noch tiefer eingeschläfert werden. Die histologische Theorie des Schlafes hat denn auch in neuerer Zeit keinen ernsthaften Vertreter mehr gefunden. Das gleiche gilt von einer Modifikation dieser Theorie durch Ramòn y Cajal, die den Schwerpunkt nicht in die Plastizität der Neurone, sondern in die Expansions- und Retraktionsvorgänge an den Neurogliazellen verlegt.

4. Psychologische Theorien des Schlafes. Es sei nur kurz erwähnt, daß man den Eintritt des Schlafes auch als einen Willensakt aufgefaßt hat, besonders mit Rücksicht auf die Tatsache, daß wir den Zeitpunkt des Einschlafens bis zu einem gewissen Grade willkürlich bestimmen können. Eine solche Auffassung ist ganz sicherlich in gewissem Sinne zutreffend, aber sie gibt uns auch nicht die geringste Analyse des Vorgangs, um den es sich hier handelt. Ebenso verhält es sich mit der Modifikation dieser Anschauung, die in dem Eintritt des Schlafes die Wirkung einer Autosuggestion erblickt, die einfach gewohnheitsmäßig jeden Abend vorgenommen wird. Mit solchen „Erklärungen" kommt die Erforschung des Vorganges um keinen Schritt weiter.

5. Die biologische Theorie des Schlafes. Als „Théorie biologique du sommeil" hat Ed. Claparède eine Auffassung des Schlafes entwickelt, die in einer Bewertung des Schlafes als Schutzvorrichtung des Organismus ihren Kernpunkt hat. „Der Schlaf ist eine aktive, positive Funktion und nicht die Folge einer Ermüdung des Organismus." Nicht die Ermüdung erzeugt den Schlaf, sondern der Schlaf ist eine Defensivvorrichtung gegen die Ermüdung. Er ist ein Instinkt, der sich geltend macht nach einem allgemeinen Gesetz, das Claparède bezeichnet als „loi de la suprématie de l'instinct momentanément le plus important". Man sieht, es handelt sich hier nicht um eine physiologische Analyse des Schlafes, sondern um eine Diskussion seiner Bedeutung für den Organismus, ein Moment, dessen Ermittlung sicherlich ihre Berechtigung hat und nicht vernachlässigt werden darf.

Es ist nicht möglich, alle Anschauungen, die gelegentlich einmal über den Schlaf und seine Genese in der wissenschaftlichen Literatur geäußert worden sind, aufzuzählen, zumal da die meisten unter ihnen einen sehr fraglichen Wert haben. Die hier aufgeführten theoretischen Deutungen des Schlafes aber enthalten alle irgendeinen Bestandteil, der bei der Aufstellung einer Theorie, die allen Tatsachen gerecht werden soll, Berücksichtigung verdient. Sie leiden nur meist an dem bereits angedeuteten Fehler, daß sie bei der Suche nach der „Ursache" des Schlafes den Tatsachenkomplex des Schlafes aus einem einzigen Moment ableiten wollen, und das ist nicht möglich. Statt nach einer einzigen „Ursache" des Schlafes zu suchen, muß vielmehr die physiologische Analyse des Schlafes bestrebt sein, möglichst alle Bedingungen des Schlafes zu ermitteln. Je mehr das geschieht, um so vollständiger wird unsere Erkenntnis des Vorgangs.

III. Analyse des Schlafvorgangs.

Die Analyse des Schlafes hat nicht nur die Bedingungen für den Eintritt des Schlafes zu ermitteln, sondern sie hat auch die Vorgänge während des Schlafes festzustellen und schließlich die Momente, welche das Erwachen herbeiführen. Aus dieser gesamten Erkenntnis wird sich dann leicht die biologische Bedeutung des Schlafes erkennen lassen.

1. Die Bedingungen für den Eintritt des Schlafes. Die Bedingungen des Einschlafens können entweder im umgebenden Medium oder im Organismus selbst gesucht werden.

1a) Die äußeren Bedingungen. Die Tatsache, daß der Schlaf ein rhythmischer Vorgang ist, der dem rhythmischen Wechsel von Tag und Nacht folgt, weist zunächst auf die Abhängigkeit von den Tageszeiten, also auf Bedingungen in der Außenwelt hin. In der Tat sehen wir noch deutlicher als beim Menschen, der durch seine Kultureinrichtungen sich bis zu einem gewissen Grade von dem Eintritt der Dunkelheit unabhängig gemacht hat, bei allen Tagtieren die vollkommenste Abhängigkeit des Schlafes vom Eintritt der Dunkelheit. Der Vogel sowohl wie die Fliege verfällt in Schlaf, sobald die Dunkelheit kommt. Der Mensch schaltet den Lichtreiz aus, wenn er einschlafen will. Das Licht ist der wichtigste Sinnesreiz für den Menschen, denn es liefert ihm die größte Mannigfaltigkeit von Empfindungen zum Aufbau seines Bewußtseinsinhalts. Unter den Bedingungen zum Einschlafen, die der Mensch in seiner Umgebung herstellt, ist aber die Ausschaltung des Lichtreizes nicht die einzige. Wir suchen sämtliche Sinnesreize, die erregend wirken könnten, möglichst einzuschränken oder gänzlich auszuschalten. Wir sorgen dafür, daß die Schlafzimmer möglichst geräuschlos, nicht zu warm und nicht zu kalt und frei von starken Gerüchen sind. Auf diese Weise wird die Tätigkeit der Sinnesorgane auf ein Minimum reduziert. Das sind die günstigsten äußeren Bedingungen zum Einschlafen. Die Sinnesreize sind diejenigen Bedingungen, die den Wachzustand erhalten. So wie ohne Sinnesempfindungen überhaupt kein Material für das Bewußtseinsleben in der Entwickelung des menschlichen Geistes gebildet wird, so wird auch die Bewußtseinstätigkeit eingeschränkt, wenn alle Sinnesreize ausgeschaltet werden. Die große Bedeutung der Sinnesreize für die Erhaltung des Wachzustandes einerseits und die gleiche Bedeutung der Ausschaltung der Sinnesreize für das Einschlafen andererseits wird am klarsten beleuchtet durch den bekannten und viel zitierten Fall von Strümpell. Strümpell hatte in seiner Klinik einen Schusterjungen, der mit Ausnahme des rechten Auges und des linken Ohres am ganzen Körper sensibel gelähmt war, so daß alle Reize außer auf diesen beiden Sinneswegen völlig unwirksam waren. Auch die sämtlichen Hautsinne waren unerregbar. Wurde diesem Jungen das rechte Auge verbunden und das linke Ohr verstopft, so hörten nach wenigen Minuten die Aeußerungen der Unruhe auf und der Junge schlief ein. Das Experiment konnte zu jeder Tageszeit mit ihm gemacht werden, wenn er vorher wach gewesen war. Es kann nach dieser und zahlreichen anderen Erfahrungen gar kein Zweifel sein, daß die äußeren Bedingungen für den Eintritt des Schlafes in der möglichsten Ausschaltung der Sinnesreize, in erster Linie der Lichtreize gelegen sind.

1b) Die inneren Bedingungen. Zu diesen äußeren Bedingungen gesellen sich aber auch innere, d. h. im Organismus und vor allem im Zentralnervensystem selbst gelegene Bedingungen. Der Fall von Strümpell hat auch ihre Existenz deutlich erkennen lassen. Wenn nämlich der Patient nach Verschluß der beiden offenstehenden Sinnespforten einige Zeit geschlafen hatte, wachte er von selbst auf, ohne daß die genannten Sinneswege wieder geöffnet wurden. Dasselbe Verhalten sehen wir beim normalen Menschen. Auch in einem möglichst von Sinnesreizen freien dunklen, kühlen, geräusch- und geruchslosen Schlafzimmer erwacht man von selbst nach einer gewissen Zeit. Es geht daraus hervor, daß im Zustande des Organismus, vor allem der Großhirnrinde zur Zeit des Einschlafens und zur Zeit des Aufwachens Verschiedenheiten bestehen müssen und es fragt sich, worin die Bedingungen für das Einschlafen im Gehirn gelegen sind.

Zur Beantwortung dieser Frage ist es nötig, kurz die Tatsachen zu überblicken, die wir über die Wirkungen der Reize auf die Elemente des Nervensystems ermittelt haben (wegen einer genaueren Darstellung dieser Verhältnisse vgl. die Artikel „Erregbarkeit“ und „Nervensystem“). Das gesamte Nervensystem ist, wie wir heute nach langen Diskussionen endlich mit voller Sicherheit sagen können, aufgebaut aus bestimmt geordneten Ketten von Neuronen, die aus den Ganglienzellen mit ihren Nervenfasern bestehen. In diesen Neuronen besteht andauernd ein Stoffumsatz und Energieumsatz, bei dem in der Ruhe die Zerfallsprozesse und die Aufbauprozesse der lebendigen Substanz sich das Gleichgewicht halten (Stoffwechselgleichgewicht und dynamisches Gleichgewicht). Wirken irgendwelche Reize ein, so wird dieses Gleichgewicht gestört. Die Sinnesreize wirken speziell auf die Zerfallsphase des Stoffwechsels, die mit Energieproduktion verbunden ist. Wird durch den Sinnesreiz die Zerfallsphase gesteigert, d. h. wirkt der Reiz erregend, so tritt dementsprechend auch eine stärkere Energieentladung seitens des Neurons ein, und dieser „nervöse Impuls“ wird durch den Nervenfortsatz des Neurons zur Ganglienzelle des nächsten Neurons fortgeleitet usf. durch ganze Ketten assoziierter Neurone hindurch. Wirkt ein erregender Reiz andauernd oder häufig wiederkehrend auf ein Neuron oder eine Neuronkette ein, so ruft er hier eine allmählich mehr und mehr zunehmende Ermüdung hervor, die charakterisiert ist durch ein Sinken der Erregbarkeit. Wie Verworn gezeigt hat, beruht dieses Absinken der Erregbarkeit bei der Ermüdung der Neurone auf einer relativen

Insuffizienz der Sauerstoffversorgung, indem der zur Verfügung stehende Sauerstoff nicht ausreicht, um den durch die dauernde Erregung gesteigerten Bedarf zu decken. Infolgedessen erfolgt der Zerfall der lebendigen Substanz nicht mehr wie im Ruhestoffwechsel rein oxydativ bis zu leicht eliminierbaren einfachen Endprodukten, wie Kohlensäure und Wasser, sondern nur bis zu organischen Produkten, die noch immer ziemlich komplexer Natur sind, wie Milchsäure und Fettsäuren usw. Die Energieproduktion ist daher bei der ermüdeten Ganglienzelle bedeutend geringer als bei der frischen und derselbe Reiz ruft eine viel schwächere Impulsentladung hervor, d. h. die Erregbarkeit ist herabgesetzt. Diese Abnahme der Erregbarkeit bei der Ermüdung wird noch unterstützt durch die Anhäufung der komplexen Produkte des anoxydativen Zerfalls, die schwer aus der Zelle herausgeschafft werden können und eine lähmende Wirkung ausüben. Hört dagegen der Reiz auf zu wirken, so tritt Erholung ein, indem das Blut die nötigen Ersatzstoffe, vor allem Sauerstoff, zuführt. Nur durch Zufuhr von Sauerstoff können, wie aus Verworns Versuchen sich ergeben hat, ermüdete Neurone wieder arbeitsfähig gemacht werden. Der Sauerstoff spaltet die komplexen Produkte des anoxydativen Zerfalls, die sich angehäuft haben, jetzt nachträglich bis zu Kohlensäure und Wasser. Diese können leicht von der Zelle an den Lymph- und Blutstrom abgegeben werden. Gleichzeitig gestattet der zugeführte Sauerstoff, daß die Zerfallsphase des Stoffwechsels wieder mehr und mehr oxydativ verläuft, so daß den oxydativen Spaltungsprozessen entsprechend wieder mehr Energie bei Einwirkung eines Reizes entladen wird als bei der Ermüdung, d. h. die Erregbarkeit steigt wieder an bis zur Norm.

Diese experimentell festgestellten Vorgänge sind es, die bei der Analyse des Schlafes eine maßgebende Rolle spielen. Die Bewußtseinsakte, die durch die Sinnesreize ausgelöst und unterhalten werden, beruhen auf der Fortleitung von solchen nervösen Erregungsimpulsen in den entsprechenden Ketten und Gruppen assoziierter Neurone. Es konnte von Verworn experimentell nachgewiesen werden, daß keine anderen Vorgänge im Nervensystem von Neuron zu Neuron fortgeleitet werden, als nur die nervösen Impulse, die einer Erregung der Zerfallsphase des Stoffwechsels entspringen. Wenn also die Bewußtseinsvorgänge dadurch zustande kommen, daß die Sinnesreize in den Neuronen der Großhirnrinde Erregungen hervorrufen, die bei den reichen Assoziationsverbindungen des Neuronennetzes der Rinde durch ganze Gruppen und Ketten von Neuronen fortgeleitet werden, dann muß eine dauernde oder häufige Einwirkung von Sinnesreizen, d. h. eine dauernde Bewußtseinstätigkeit auch mit einer entsprechenden Ermüdung der beteiligten Neurone verknüpft sein. Während des Tages, d. h. im Wachzustande wirken fortdauernd Sinnesreize der verschiedensten Art auf uns ein, vor allem Lichtreize und die Bewußtseinstätigkeit besteht fast ohne Unterbrechung fort. Infolgedessen muß sich in den Neuronen des Gehirns im Laufe der täglichen Wachperiode eine allmählich zunehmende Ermüdung, d. h. Erregbarkeitsabnahme auf der oben geschilderten Basis bemerkbar machen. Diese Erregbarkeitsabnahme braucht man sich nicht stark zu denken, etwa bis zur völligen Unerregbarkeit, sondern nur leicht, als relative Erregbarkeitserniedrigung gegenüber dem unermüdeten Zustande der Neurone. Daß sie da ist, haben uns die zahlreichen Experimente der Experimentalpsychologen über die Veränderung der Aufmerksamkeit, sowie der Geschwindigkeit im Verlauf der Bewußtseinsakte, vor allem des Denkens gezeigt. Ueber den Ort ihrer Entwickelung im Gehirn können wir vorläufig nichts Näheres angeben. Es mag sein, daß diese relative Ermüdung diffus in den verschiedensten Gebieten der Hirnrinde verbreitet ist, es ist aber auch möglich, daß sie besonders stark in den ersten Ganglienzellstationen, welche die Erregung vom Sinnesorgan her passiert, entwickelt ist. Vielleicht werden sich sehr bald Erfahrungen ergeben, die uns diese Frage weiter beleuchten. Vorläufig können wir nur allgemein von den Neuronen des Gehirns sprechen und dürfen nicht näher spezialisieren. Soviel aber steht fest, daß im Laufe des Wachseins die Erregbarkeit in gewissen Neuronen des Gehirns sinkt. Darin liegt der Unterschied im Zustande des Gehirns beim Einschlafen und beim Erwachen. Darin liegen auch die inneren Bedingungen für das Einschlafen.

Aber es wäre ebenso einseitig und falsch, diese inneren Bedingungen allein für den Eintritt des Schlafes verantwortlich zu machen, wie es falsch und einseitig wäre, nur die Ausschaltung der Sinnesreize als „Ursache" für den Eintritt des Schlafes zu bezeichnen. Da wir auch trotz einer gewissen Müdigkeit zur gewöhnlichen Zeit des Schlafengehens noch lange Zeit wach bleiben können, da es uns also möglich ist, den Eintritt des Schlafes bis zu einer gewissen Grenze willkürlich zu bestimmen, so kann die Abnahme der Erregbarkeit durch Ermüdung nicht der einzige Faktor sein, der den Eintritt des Schlafes bestimmt.

Die Veränderungen, welche sich während des Wachzustandes unter dem dauernden Einfluß der Sinnesreize vollziehen, sind in neuester Zeit sehr eingehend durch lange Versuchsreihen an Hunden von Legendre und Piéron studiert worden. Diese Experimentatoren haben den Eintritt des Schlafes bei Hunden andauernd verhindert, bis zu 12 Tagen und haben dabei festgestellt, daß sich nicht bloß

äußerlich in dem Verhalten der Hunde die stärksten Ermüdungserscheinungen bemerkbar machen, indem die Tiere schließlich nicht mehr aufrecht zu stehen und zu gehen vermögen, sondern daß sich auch in den Neuronen der Großhirnrinde die typischen histologischen Bilder entwickeln, die man von stark ermüdeten Ganglienzellen kennt. Gleichzeitig häufen sich, je länger der Wachzustand dauert, um so mehr toxische Stoffe in der Cerebrospinalflüssigkeit und im Blute an, die in Wasser löslich sind und die bei normalen Hunden in die Gehirnhöhlen eingespritzt wiederum die typischen Ermüdungssymptome sowohl physiologisch wie histologisch hervorrufen. Diese sorgfältigen und mühsamen Untersuchungen von Legendre und Piéron demonstrieren in schlagender Weise die Veränderungen, die sich während des Wachzustandes vollziehen und die am Ende des Wachseins, je nach der Dauer desselben von einer mehr oder weniger starken Ermüdung, d. h. Erregbarkeitsherabsetzung der Centren begleitet sind. Unter normalen Verhältnissen, d. h. wenn der Eintritt des Schlafes nicht künstlich durch Reize verhindert wird, schützt sich der Organismus aber vor einer zu weit gehenden Ermüdung und ihren schädlichen Folgen durch den Schlaf. In diesem Sinne ist Claparèdes Auffassung des Schlafes als einer Schutzeinrichtung gegen zu starke Ermüdung zweifellos berechtigt. Aber es bedarf doch noch einer genaueren Feststellung des Mechanismus, durch den diese Schutzvorrichtung unter normalen Verhältnissen in Funktion gesetzt wird.

Beim Menschen ist dieser Mechanismus auf Grund der Feststellungen über die Ermüdung der Centra aus sehr bekannten Tatsachen nunmehr leicht erkennbar. Es muß hier unterschieden werden zwischen der willkürlichen Bestimmung der Zeit des Einschlafens und dem automatischen Einschlafen. Die erstere ist im wesentlichen durch Gewohnheit geregelt und kann, wie schon gesagt, bis zu einem gewissen Grade variiert werden durch den willkürlichen früheren oder späteren Ausschluß der Sinnesreize, vor allem des Lichtreizes. Schon das längere Schließen der Augen am Abend bei einem gewissen Ermüdungsgrade genügt oft, ohne daß man das Schlafzimmer aufgesucht und alle Vorbereitungen zum Einschlafen getroffen hat, um in wenigen Minuten Einschlafen zu erzeugen. Hier hängt also der Zeitpunkt des Einschlafens innerhalb gewisser Grenzen vom Willen ab. Insofern ist die Anschauung, daß der Schlaf ein Willensakt sei, berechtigt, wenn sie auch keinerlei Analyse des Vorgangs selbst gibt. Beim Kinde aber, das noch nicht gewöhnt ist, seine Handlungen in dem Maße willkürlich zu bestimmen, wie der Erwachsene, wird der Eintritt des Schlafes durch einen rein automatischen Mechanismus der Ausschaltung der wichtigsten Sinnesreize, d. h. der Lichtreize bestimmt. Diejenigen Muskeln, die am Tage fast dauernd tätig sind und deren Centra verhältnismäßig stark ermüden, sind die Hebemuskeln der oberen Augenlider. Ist die Erregbarkeit in den Centren dieser Muskeln durch Ermüdung während des Wachzustandes bis auf ein gewisses Niveau gesunken, so tritt mehr und mehr auch subjektiv merkbar in den Augen das Müdigkeitsgefühl auf und die Neigung, die Augen zu schließen. Beim Kinde erfolgt das Schließen der Augen rein automatisch, sobald ein bestimmter Grad der Ermüdung erreicht ist. Ist aber die wichtigste Gruppe von Sinnesreizen ausgeschaltet, so entwickelt sich auf dem Boden der bestehenden Ermüdung der Schlaf von selbst. Im automatischen Schluß der Augenlider haben wir also einen von den physiologischen Selbststeuerungsmechanismen vor uns, an denen der Organismenkörper so reich ist. Wie bei allen diesen Selbststeuerungsmechanismen führen die Folgen der vorhandenen Bedingungen selbst zu einer Beseitigung der vorhandenen Bedingungen. Die Ermüdung löst, wenn sie einen bestimmten Grad erreicht hat, unter physiologischen Verhältnissen selbst den Mechanismus für die Ausschaltung ihrer Bedingungen aus. Im Lidschluß bei Ermüdung besitzen wir eine automatisch tätige Sicherungsvorrichtung des Organismus. Das ist der physiologische Mechanismus des Einschlafens beim Menschen. Der spezielle Selbststeuerungsmechanismus wird zweifellos bei vielen Tagtieren derselbe sein wie beim Menschen, bei anderen Tieren und vor allem bei den Nachttieren, die an das Wachsein in der Dunkelheit angepaßt sind, werden andere spezielle Sicherungsmechanismen für den Eintritt des Schlafes entwickelt sein, die erst im einzelnen Falle analysiert werden müssen.

2. Die Vorgänge während des Schlafes. Nach den oben kurz skizzierten Erfahrungen über die Vorgänge, die sich unter dem Einfluß der Reize in den Neuronen abspielen, ist es nunmehr leicht, sich ein Bild von den Vorgängen während des Schlafes in den Neuronen des Großhirns zu machen. Die Untersuchungen über die Ermüdung, d. h. die Erregbarkeitsabnahme, die durch den Wachzustand bedingt im Beginn des Schlafes vorhanden ist, ferner die übereinstimmenden Ergebnisse der Untersuchungen über die Tiefe des Schlafes während seiner Dauer, und schließlich die Tatsache, daß beim Erwachen die Erregbarkeit wieder ihren spezifischen Höhepunkt erreicht hat, so daß die Neurone von neuem arbeitsfähig geworden sind, geben uns das gesamte Material in die Hand, das zur Konstruktion der Vorgänge während des Schlafes erforderlich ist.

Nach der Ausschaltung der Sinnesreize klingen die Erregungen, welche durch sie im Zentralnervensystem unterhalten worden sind, nur sehr allmählich im Laufe der

ersten Stunde nach dem Einschlafen ab. Das macht sich zunächst in einer weiteren, scheinbaren Senkung der Erregbarkeit für Weckreize bemerkbar. Diese aus dem Steigen der Reizschwelle für die Prüfungsreize sich ergebende Tatsache ist jedenfalls darauf zurückzuführen, daß unmittelbar nach dem Ausschalten der Sinnesreize die Erregungssummation noch eine Rolle spielt. Die Erregungen in den Neuronen, die von den Sinnesreizen unterhalten wurden, sind anfangs bei Beginn des Schlafes noch nicht völlig abgeklungen, was, wie wir wissen, bei ermüdeten Objekten immer sehr langsam erfolgt, und so können sich anfangs noch die durch die Prüfungsreize hervorgerufenen Erregungen mit diesem Erregungsrückstand summieren, so daß anfangs nach dem Einschlafen noch schwächere Prüfungsreize wirksam sind, als etwas später, wenn die Tageserregungen ganz vollständig abgeklungen sind. Innerhalb der ersten Stunde aber ist das letzere der Fall, denn zu dieser Zeit ist die Tiefe des Schlafes am größten, d. h. die Erregbarkeit für Prüfungsreize hat ihren niedrigsten Grad erreicht. Von hier an beginnt die Erregbarkeit wieder zu steigen, und zwar ist der Verlauf der Erregbarkeitskurve ein sehr charakteristischer. Die Erregbarkeit nimmt erst sehr schnell, dann immer langsamer und langsamer zu bis zum Erwachen. Sie hat eine logarithmische Form genau derselben Art, wie wir sie von allen Erholungskurven nach starker Ermüdung kennen. Bei allen Formen der lebendigen Substanz sehen wir im Gefolge der Erregung, die ein Reiz hervorruft, eine Veränderung der Erregbarkeit auftreten, das sogenannte „Refraktärstadium", während dessen die Erregbarkeit erst plötzlich stark absinkt und darauf zunächst schnell, dann immer langsamer wieder zur normalen Höhe zurückkehrt. Genau so verhält sich die Erregbarkeit im Schlaf. Der Schlaf stellt ein sehr lang hingezogenes relatives Refraktärstadium vor, während dessen sich die Erregbarkeit in der Gestalt einer logarithmischen Kurve allmählich wieder herstellt. Diese Wiederherstellung der Erregbarkeit ist gebunden an die Restitutionsprozesse des Stoffwechsels, die in erster Linie durch Aufnahme von Sauerstoff aus Lymphe und Blut und durch Abgabe der Stoffwechselprodukte in der oben kurz geschilderten Weise zustande kommt. Wachen und Schlafen bilden also in größeren Intervallen genau den gleichen rhythmischen Vorgang, wie ihn jede rhythmische Reizung in kleineren Intervallen an jedem lebendigen Objekt hervorruft und wie er allen rhythmischen Lebensäußerungen zugrunde liegt. Ein einfacheres Analogon mit kürzeren Intervallen bildet z. B. die rhythmische Herztätigkeit. Was der systolische Impuls an lebendiger Substanz zum Zerfall und an Energie zur Entladung bringt, das wird während der darauf folgenden diastolischen Ruhe aus dem Blutstrom wieder ersetzt. Auch hier ist es in erster Linie der Sauerstoff, der zur Restitution erforderlich ist.

Wachen und Schlafen beruht genau auf den gleichen Vorgängen wie Systole und Diastole des Herzens, wie der Rhythmus der Atemimpulse, und wie alle anderen rhythmischen Vorgänge unter dem Einfluß von erregenden Reizen. Die Analogie ist vollkommen. Der Schlaf ist nur ein spezieller Fall eines relativen Refraktärstadiums, während dessen sich im Intervall zwischen zwei Reizperioden, wie sie das Wachsein vorstellt, die Erholung vollzieht. Grade darin liegt die große physiologische Bedeutung des Schlafes. Er ist charakterisiert durch die Restitutionsprozesse. Deswegen ist der Schlaf unentbehrlich und deswegen ist die dauernde Verkürzung oder künstliche Verhinderung des Schlafes mit schweren Schädigungen verbunden.

3. Die Bedingungen des Erwachens. Nach dem Vorhergehenden sind nunmehr auch die Bedingungen für das Erwachen ohne weiteres verständlich. Ist die Erregbarkeit während des Schlafes wieder bis auf ihren höchsten Grad angestiegen, so rufen bereits ganz schwache Reize Erwachen hervor. Solche schwachen Reize sind teils in der äußeren Umgebung stets in gewissem Grade vorhanden: das Licht dringt, wenn auch nur schwach, selbst durch die geschlossenen Augenlider; die Geräusche des Tages beginnen usf.; teils entspringen die Reize, welche zum Erwachen führen, den inneren Organen des Körpers: die Lage wird unbequem, es entstehen Druckreize; Mastdarm und Blase füllen sich mehr und mehr, es entwickelt sich Durst usf. Diese inneren Reize steigern sich und wenn sie die Reizschwelle überschreiten, führen sie das Erwachen herbei. Das Assoziationsgetriebe der Erregungen in der Großhirnrinde beginnt in erfrischtem Zustande von neuem. Die Bedingungen für das Erwachen sind also wieder dieselben, die auch den Wachzustand erhalten: ein gewisser hoher Erregbarkeitsgrad der Neurone und die Einwirkung von Sinnesreizen. Ein tage- oder wochenlang andauernder Schlaf kommt nicht vor. Die Fälle, in denen das Bewußtsein tage- oder wochenlang unterbrochen ist, wie in den viel zitierten Beispielen vom „schlafenden Bergmann" usw., stellen keinen physiologischen Schlaf, sondern pathologische Bewußtseinslähmungen vor, die mit dem normalen Schlaf nichts zu tun haben.

IV. Unterschiede des Schlafes von ähnlichen Zuständen der Bewußtlosigkeit.

Seit dem Altertum bis in die heutige Zeit, ja selbst bis in die moderne Medizin hinein

hat man eine Reihe von anderen Zuständen, in denen das Bewußtsein erlischt, ohne weiteres mit dem Schlaf identifizieren zu dürfen geglaubt. So hat man den Winterschlaf und die Narkose einfach als Schlaf bezeichnet und selbst Physiologen haben ohne genauere Prüfung diese Zustände als gleich betrachtet. Aber auch andere Zustände, in denen nicht einmal eine vollständige Aufhebung der Bewußtseinsakte besteht, wie die Hypnose, sind mit dem Schlaf in Zusammenhang gebracht worden. Es ist daher nötig, diese Zustände näher zu betrachten und zu prüfen, ob sie auf denselben Prinzipien beruhen, die für den Schlaf ermittelt worden sind.

1. Der Winterschlaf. Der Winterschlaf stellt zwar äußerlich ebenfalls einen Zustand der Ruhe gegenüber der normalen Tätigkeit des Säugetierkörpers dar, in dem die Lebensprozesse herabgesetzt sind, aber darin dürfte auch die ganze Aehnlichkeit zwischen beiden Zuständen bestehen. Die Genese und die Bedingungen für die Tätigkeits- und Erregbarkeitsherabsetzung sind in beiden Fällen total verschieden. Beim Winterschläfer entsteht die Herabsetzung aller Lebensvorgänge, die einen solchen Grad erreicht, wie er beim Schlaf niemals auch nur annähernd vorkommt, dadurch, daß seine Temperaturregulierungsmechanismen bei niedrigen Temperaturen versagen, so daß die Körpertemperatur sinkt und der Warmblüter dem Kaltblüter ähnlich wird. Die Erniedrigung der Körpertemperatur bedingt in diesem Zustande wie beim Kaltblüter eine entsprechende Verminderung des Stoff- und Energieumsatzes, die mit einer entsprechenden Erniedrigung der Erregbarkeit verbunden ist. Das alles vollzieht sich nach bekannten physikalisch-chemischen Gesetzen. Dabei wird aber nicht bloß quantitativ die Intensität des Stoffwechsels und Energieumsatzes entsprechend der niedrigen Temperatur vermindert, sondern es machen sich auch qualitative Aenderungen bemerkbar. Wie Nagai in neuester Zeit durch ein umfangreiches Studium des Stoffwechsels beim Winterschläfer gezeigt hat, werden besonders die Oxydationsprozesse stark eingeschränkt, während der spärliche Zerfall der lebendigen Substanz, analog einer relativen Insuffizienz der Sauerstoffversorgung bei normaler Körpertemperatur, zum Teil anoxydativ verläuft. In diesem Punkte hat also der Winterschlaf eher Analogien zu einer schwachen Erstickung oder schwachen Ermüdung, als zum Schlaf, bei dem gerade die durch Ermüdung während des Wachzustandes angehäuften Produkte unvollkommener Oxydation durch relatives Ueberwiegen des Sauerstoffwechsels beseitigt werden, so daß eine Erholung eintritt. Es spielen sich also im Schlaf und im Winterschlaf ganz verschiedenartige Prozesse ab, die zum Teil diametral entgegengesetzt sind und man muß endlich aufhören, beide Zustände miteinander zu verwechseln. Erregbarkeitsherabsetzungen können in der lebendigen Substanz auf verschiedene Weise erzielt werden, aber Erregbarkeitsherabsetzung ist noch nicht Schlaf. Der Schlaf ist vielmehr charakterisiert durch die Prozesse, welche die Erregbarkeit wieder zur normalen Höhe ansteigen lassen. Die Erregbarkeitsherabsetzung, die wir im Schlaf finden, hat ihre Bedingungen nicht im Schlaf selbst, sondern vielmehr im vorausgehenden Wachzustand. Ein volles Analogon hat daher der Schlaf, wie bereits gezeigt, nur in dem relativen Refraktärstadium, das jeder erregende Reiz bei aller lebendigen Substanz im Gefolge hat. Der Schlaf ist ein Spezialfall dieses Refraktärstadiums, nichts anderes.

2. Die Narkose. Auch die Narkose ist ein mit dem Aufhören der Bewußtseinstätigkeit verbundener Zustand, der noch heute sogar von Physiologen und Aerzten vielfach einfach als Schlaf betrachtet wird. In Wirklichkeit können wir heute auf Grund aller neueren Erfahrungen über die Narkose sagen, daß keinerlei nähere Analogie mit dem Schlafe besteht. Eine totale Verschiedenheit aber liegt gerade wieder in dem Moment, das dem Schlaf seine große physiologische Bedeutung gibt, das ist in den Prozessen der Restitution. Es hat sich ergeben, daß die Erholung im Schlaf im wesentlichen auf dem ungehinderten Ablauf der Oxydationsprozesse beruht. Der Sauerstoff beseitigt durch oxydative Spaltung die angehäuften Ermüdungsstoffe und der Sauerstoff gibt die Möglichkeit zu oxydativem Zerfall bei Einwirkung von Reizen und damit zu stärkerer Energieentladung, d. h. er steigert die Erregbarkeit. Bei der Narkose aber findet in der lebendigen Substanz eine Unterdrückung der Oxydationsprozesse statt, bei Fortbestehen anoxydativer Spaltungsprozesse. Das ist aus den zahlreichen Untersuchungen Verworns und seiner Mitarbeiter zweifellos hervorgegangen und seitdem von zahlreichen anderen Forschern an verschiedenen Objekten bestätigt worden (vgl. darüber den Artikel „Narkose"). Wir haben also auch in der Narkose einen Zustand herabgesetzter Erregbarkeit und dementsprechend aufgehobener Bewußtseinstätigkeit vor uns, in dem gerade das wesentliche Moment des Schlafes, die Restitution durch Sauerstoffaufnahme unterdrückt ist, und der daher in keiner Weise mit dem Schlaf analogisiert werden kann.

3. Die Hypnose. Die Hypnose schließlich könnte von vornherein nur partiell mit dem

Schlaf verglichen werden, denn in der Hypnose spielen sich Bewußtseinsvorgänge sogar sehr intensiver Art ab. Was die Hypnose charakterisiert, ist nur die Art und Weise des Ablaufs der durch Suggestion hervorgerufenen Bewußtseinsvorgänge, der sich dadurch vom gewöhnlichen Wachzustand unterscheidet, daß die suggestiv erweckten Vorstellungen, Gedanken, Handlungen, Gefühle nicht in genügendem Maße der Kritik durch andere Vorstellungen unterliegen und daher vielfach einen absurden Charakter annehmen können. Der suggestiv hervorgerufene Bewußtseinsakt in der Hypnose ist so intensiv, daß alle anderen Bewußtseinsvorgänge mehr oder weniger vollständig gehemmt sind. In dieser Hemmung des übrigen Bewußtseinslebens allein könnte man einen Vergleichspunkt der Hypnose mit dem Schlaf erblicken wollen, insofern als in ihr ein partieller Ausfall der Bewußtseinstätigkeit zum Ausdruck kommt. Indessen diese Hemmung gewisser Vorstellungen durch andere ist ein Vorgang, den wir, wenn auch quantitativ in geringerer Intensität fortwährend nicht im Schlaf, sondern im Wachzustand beobachten und der während unserer ganzen Bewußtseinstätigkeit prinzipiell in der gleichen Weise sich dokumentiert in der Tatsache, daß jeder neu im Bewußtseinsfelde auftauchende Komplex von assoziierten Vorstellungen jeden vorhandenen hemmt und auslöscht. Wir können nicht zwei verschiedenartige Vorstellungskomplexe, die nicht assoziativ miteinander verbunden sind, gleichzeitig im Bewußtseinsfelde haben. Der intensivere hemmt den weniger intensiven, und zwar um so stärker, je intensiver er ist. Der Unterschied gegenüber den Vorstellungshemmungen in der Hypnose ist nur ein Intensitätsunterschied. Aber nach allem, was wir heute über den Mechanismus der nervösen Hemmungsprozesse wissen, kommt die Hemmung, d. h. die Unterdrückung einer Erregung, die ein Reiz hervorbringt, immer nur dadurch zustande, daß eine andere Erregung, die ein anderer Reiz hervorruft, mit ihr interferiert. Hemmungen entstehen immer nur durch Interferenz von erregenden Reizwirkungen (vgl. die Artikel „Nervensystem" und „Erregbarkeit"). Im Schlafe aber handelt es sich gerade um ein Aufhören der Erregungen infolge des Ausschaltens der Reize. Es kann also auch die Hypnose nicht mit dem Schlaf, sondern nur mit dem Wachzustande verglichen werden. Sie stellt einen typischen Wachzustand vor (vgl. den Artikel „Hypnose").

V. Der Traum.

Ein sehr häufiger Vorgang während des Schlafes ist das Auftreten von Träumen. Die Bedingungen für die Entstehung von Träumen sind aber bei verschiedenen Menschen sehr verschieden realisiert. Manche Menschen träumen fast regelmäßig jede Nacht, andere nur äußerst selten.

1. Der Traum als partieller Wachzustand. Der Traum stellt sich dar als Bewußtseinsvorgang. Er ist also eine partielle Unterbrechung des Schlafes oder ein Wachzustand einzelner Assoziationsbahnen der Großhirnrinde, während andere sich im Schlaf befinden. Traum und Schlaf sind demnach prinzipiell entgegengesetzte Zustände.

2. Die Genese des Traumes. Diese Auffassung wird zunächst bestätigt durch die Genese der Träume. Träume sind bedingt durch Reize, sei es, daß die Reize in der Umgebung, sei es, daß sie im Körper selbst ihren Ursprung haben. Durch äußere Reize lassen sich experimentell Träume hervorrufen. So sind von verschiedenen Experimentatoren durch akustische, durch Geruchs- und durch Hautreize Träume künstlich ausgelöst worden. In vielen Fällen von scheinbar spontanen Träumen, besonders in manchen typischen, weitverbreiteten Traumformen, wie dem Angsttraum, läßt sich der äußere Reiz nachweisen. Beim Albtraum liegt er in einem Atemhindernis, wie es schlechte Lage des Schlafenden, partieller Verschluß von Nase und Mund usw. hervorbringen. Die experimentell erzeugten Träume schließen sich inhaltlich zunächst immer eng an die Art des auslösenden Sinnesreizes an, können dann aber assoziativ weit ausgesponnen werden. Sehr häufig sind die Träume, die bei krankhaften Prozessen in inneren Organen durch die von hier ausgehenden inneren Reize ausgelöst werden. Kranke träumen häufiger als Gesunde.

3. Die Traumperiode des Schlafes. Wenn die Träume wie alle Bewußtseinsprozesse auf Erregungsvorgängen in den Neuronen beruhen, die durch Reize ausgelöst werden, dann müssen die Bedingungen bei der Entstehung von Träumen zu verschiedenen Zeiten des Schlafes verschieden günstig sein entsprechend der Tiefe des Schlafes d. h. entsprechend dem Erregbarkeitsgrade der Neurone. Die Reize müssen bei um so geringerer Intensität Träume hervorrufen, je höher der Erregbarkeitsgrad der Neurone, also je geringer die Tiefe des Schlafes ist. Das ist in der Tat der Fall. Diejenige Periode des Schlafes, in der die allergrößte Mehrzahl von Träumen auftritt, ist beim normalen Menschen die Zeit, in der die Tiefe des Schlafes schon wieder abgenommen hat, also die zweite Hälfte der Schlafperiode. Selten treten Träume zur Zeit ein, wo der

Schlaf die größte Tiefe hat. Bisweilen aber werden auch kurz nach dem Einschlafen Träume beobachtet, ehe der Schlaf seine größte Tiefe erreicht hat. Bei Kranken liegen die Verhältnisse entsprechend den unregelmäßigen Schwankungen in der Tiefe des Schlafes verschieden.

Vielfach hat man die Frage erörtert, ob es überhaupt einen traumlosen Schlaf gebe. Einzelne Autoren wie Exner, Meumann u. a. sind auch in neuerer Zeit noch mehr oder weniger geneigt, einen traumlosen Schlaf zu leugnen. Sie sind der Ansicht, daß wir in den Fällen, in denen wir wirklich traumlos geschlafen zu haben glauben, den Traum nur wieder vergessen haben. Indessen auf diese Weise lassen sich Ansichten nicht in befriedigender Weise begründen. Wenn es auch zweifellos feststeht, daß wir uns sehr häufig an Träume am Morgen nicht mehr erinnern können und daß wir doch ihr Vorhandengewesensein daraus erkennen, daß sie uns am nächsten Abend beim Schlafengehen durch die gleichen äußeren Bedingungen wieder assoziativ ins Gedächtnis gerufen werden, so liegt doch keinerlei Grund vor, dieses Verhältnis zu verallgemeinern. Die Tatsache der starken Erregbarkeitsherabsetzung in den Ganglienzellen des Gehirns während des tiefen Schlafs macht allein schon die Annahme, daß auch im tiefen Schlaf dauernd Träume vorhanden sind, physiologisch höchst unwahrscheinlich, denn wir sehen, daß wenn die Erregbarkeit der Neurone in der Rinde irgendwie, z. B. durch Narkose, momentane Anämie usw. auch nur wenig herabgesetzt wird, bereits das Bewußtsein erlischt. Gerade das Erlöschen des Bewußtseins ist ja ein typisches Symptom des Schlafes. Der Traum aber ist Bewußtseinstätigkeit.

4. Der Inhalt der Träume. So mannigfaltig wie das Assoziationsleben des Wachzustandes ist auch der Inhalt des Traumlebens. Jedes Gebiet der Großhirnrinde kann am Traumleben teilnehmen, wenn es durch Reize in den Wachzustand versetzt wird. Wir können demnach optische, akustische Empfindungen und Vorstellungen, Geruchs-, Geschmacks-, Temperatur-, Tast-, Schmerzempfindungen und -vorstellungen, wir können aber auch Bewegungsempfindungen oder -vorstellungen im Traumleben haben und die letzteren können so wirksam werden, daß wirkliche Handlungen im Traume entstehen. Bei Somnambulen, wo das motorische Gebiet besonders leicht in den Wachzustand versetzt wird, während andere Rindengebiete tief schlafen, kommt es zu recht komplizierten Handlungen im Schlaf. Die Hauptmasse der Träume dürften aber wohl beim normalen Menschen entsprechend der überwiegenden Bedeutung des Gesichtssinnes für unser geistiges Leben die optischen Träume bilden, d. h. die Träume, in denen die Gesichtsvorstellungen die erste Rolle spielen. Viel seltener sind akustische Träume, sehr selten Geschmacksträume. Eine völlig verkehrte Einseitigkeit ist es, wenn man alle oder auch nur die Mehrzahl der Träume, wie es Freud tut, mit der sexuellen Sphäre in Beziehung setzen und in jeden Traum mit Gewalt ein sexuelles Moment hineindeuten will. Diese Art Traumdeuterei steht auf der gleichen Stufe wie die Weisheit der alten Traumbücher und richtet außerdem noch bei vielen Patienten unberechenbaren Schaden an. Im Traum kann dieselbe Fülle von Vorstellungen und Gedanken auftreten wie im Wachzustand, und die Behauptung, daß die Träume hauptsächlich sexuellen Ursprung und Inhalt haben, ist genau so absurd wie die Behauptung wäre, daß unser Geistesleben im wesentlichen sexueller Natur sei.

5. Der ataktische Charakter der Träume. Ein sehr verbreitetes, wenn auch durchaus nicht allgemeines Merkmal des Ablaufs der Assoziationen im Traum ist der Fortfall der Kritik derselben durch das übrige Vorstellungsleben. Dieses Moment entspringt der Tatsache, daß eben nicht die ganze Rinde im Traume wacht, sondern nur einzelne Teile. In diesem Punkte hat der Traum eine gewisse Aehnlichkeit mit den hypnotischen Suggestionen. Er gewinnt dadurch etwas Bizarres und Phantastisches, weil die Maßstäbe fehlen, an denen die Dimensionen, Werte und Bedeutungen der Dinge kritisch gemessen und beurteilt werden könnten. Der Assoziationsablauf im Traume hat daher einen ataktischen Charakter und erinnert lebhaft an den ataktischen Charakter des Erregungsablaufs, den wir bei gewissen Rückenmarkserkrankungen, wie bei der Tabes, auf motorischem Gebiete beobachten. In der Tat sind die Bedingungen auch in beiden Fällen prinzipiell die gleichen. In beiden Fällen ist die Erregbarkeit einzelner Neuronstationen verändert, anderer erhalten. Daraus entspringen Störungen in dem koordinierten Zusammenarbeiten der Neurone, deren Ausdruck eben der ataktische Charakter des Erregungsablaufs ist.

Indessen braucht der Traum nicht ataktisch zu sein. Die Assoziationsvorgänge, namentlich wenn sie sich nur auf einem bestimmten engen Gebiet bewegen, können sich durchaus koordiniert abwickeln und es ist bekannt, daß Voltaire im Traume sogar gedichtet hat.

Literatur. **Haller**, *Elementa physiologiae corporis humani. Tomus quintus. Lausanae 1769.* —

Purkinje, *Wachen, Schlaf, Traum und verwandte Zustände. In Wagners Handwörterbuch der Physiologie, Bd.* 3. *Braunschweig 1846.* — **Exner**, *Physiologie der Großhirnrinde. In Hermanns, Handbuch der Physiologie, Bd.* 2. *Leipzig 1879.* — **Sante de Sanctis**, *Die Träume. Medizinisch-psychologische Untersuchungen. Deutsche Ausgabe von O. Schmidt. Halle 1901.* — **Claparède**, *Esquisse d'une Théorie biologique du sommeil. Genève 1905.* — **Wundt**, *Grundzüge der physiologischen Psychologie, Bd.* 3, *5. Aufl. Leipzig 1903.* — **Kohlschütter**, *Messungen der Festigkeit des Schlafes. In Henle und Pfeuffers Zeitschrift für rationelle Medizin, 3. Reihe, Bd.* 17, *1863.* — **Pflüger**, *Theorie des Schlafes. In Pflügers Archiv, Bd.* 10, *1875.* — **Preyer**, *Ueber die Ursachen des Schafes. Vortrag, Stuttgart, 1877.* — **M. Verworn**, *Die Mechanik des Geisteslebens,* 2. *Aufl., Leipzig 1910.* — **Derselbe**, *Ermüdung, Erschöpfung und Erholung der nervösen Centra des Rückenmarks. Archiv für Anatomie und Physiologie, physiologische Abteilung, 2. Suppl. 1900.*

M. Verworn.

Schlagende Wetter.

Das sind brennbare Gase (hauptsächlich Sumpfgas), welche bei dem Fossilisationsprozeß der Kohlen entstehen und in den Kohlen eingeschlossen sind. Beim Abbau der Kohlen entweichen sie und bilden in gewissem Verhältnis mit Luft gemischt explosive Gemenge. Die Gemenge mit anderen giftigen Gasen, wie Kohlensäure und Kohlenoxyd, heißen auch giftige Schwaden (vgl. den Artikel „Kohlen").

Schlammvulkane

= Schlammsprudel, Salsen, Macaluben. Nicht gar selten auftretende, meist kleine, im Kaspigebiet aber bis 30 Meter hohe flachkegelige Schlammaufschüttungen, die oben eine kraterähnliche Vertiefung besitzen. Sie haben mit Vulkanen gar nichts zu tun, sondern entstehen durch das Emporquellen von Gasen (Sumpfgas, Kohlensäure) mit manchmal warmem Wasser und Schlamm und stehen häufig in Beziehungen zu Petroleum- und Asphaltlagern.

von Schlechtendal

Diedrich Franz Leonhard.

Geboren am 27. November 1794 in Xanten am Rhein. Er empfing seine Vorbildung in Berlin, wo er auch 1813 zum Studium der Medizin und der Naturwissenschaften die Universität bezog und 1819 promovierte. Im selben Jahre wurde er Kustos des dortigen, aus den Willdenowschen Sammlungen neu begründeten königlichen Herbars, ein Amt, das er zunächst allein, seit 1822 mit A. v. Chamisso gemeinsam führte. Daneben habilitierte er sich 1826 als Privatdozent und begründete im selben Jahre die Zeitschrift „Linnaea", deren Redaktion er bis zu seinem Tode fortführte. Im folgenden Jahre wurde er zum außerordentlichen Professor der Botanik und 1833 zum ordentlichen Professor der Botanik und zum Direktor des botanischen Gartens in Halle ernannt, wo er am 12. Oktober 1866 starb. Seine wissenschaftlichen Arbeiten beschränken sich fast ganz auf das Gebiet der beschreibenden systematischen Botanik. Erwähnt seien die „Flora Berolinensis" (2 Teile, Berlin 1823 bis 1824), die „Abbildung und Beschreibung aller in der Pharmakopoea borussica aufgeführten Gewächse" (3 Bände, ebenda 1830 bis 1837), der „Hortus Halensis" (Halle 1841 bis 1853). Seine übrigen Arbeiten sind meist kleineren Umfangs und betreffen auswärtige Floren (Mexiko, Labrador, Böhmen usw.) oder bestimmte Familien (Gramineen, Cyperaceen, Coniferen, Ranunculaceen, Farne, Pilze usw.).

Literatur. *De Bary, in der „Botanische Zeitung" (deren Redakteur v. Schlechtendal seit ihrer Begründung neben Hugo v. Mohl gewesen war), Bd.* 25 *(1867), S. 321 bis 328; dort auch ein Schriftenverzeichnis.*

W. Ruhland.

Schleiden

Matthias Jakob.

Geboren am 5. April 1804 zu Hamburg. Nach Absolvierung des Johanneums daselbst studierte er von 1824 bis 1827 in Heidelberg Rechte, promovierte zum Dr. jur. und lebte bis 1831 in Hamburg als Advokat. 1833 zog er nach Göttingen, später nach Berlin, um Medizin zu studieren, widmete sich jedoch bald ganz der Botanik, 1839 promovierte er in Jena zum Dr. phil. und wurde ebendort im gleichen Jahre außerordentlicher Professor der Botanik, im Jahre 1846 ordentlicher Honorarprofessor und 1850 ordentlicher Professor in der medizinischen Fakultät. 1862 gab er diese Stellung auf und siedelte nach Dresden über, um aber schon im nächsten Jahre einem Ruf als Professor nach Dorpat zu folgen. Er gab jedoch infolge von Differenzen in kirchlichen Dingen schon 1864 auch diese Stellung wieder auf und kehrte als Privatmann nach Dresden zurück. Von da siedelte er, nach kürzerem Aufenthalte in Frankfurt a. M., 1872 nach Darmstadt über, 1877 nach Wiesbaden und Anfang April 1881 wieder nach Frankfurt, wo er am 23. Juni desselben Jahres starb.

Schleiden hat durch sein Lehrbuch „Grundzüge der wissenschaftlichen Botanik nebst einer methodologischen Einleitung zum Studium der Pflanze" (2 Teile, Leipzig 1842 bis 1843) auf die Entwickelung der Botanik als Wissenschaft einen tiefgehenden reformatorischen Einfluß

ausgeübt, indem er gegenüber der älteren, oft unwissenschaftlichen und gedankenlosen Behandlung die in der Physik und Chemie geltenden Methoden auf den Schild erhob (vgl. den Haupttitel der 2. Auflage des genannten Lehrbuchs „Die Botanik, als induktive Wissenschaft behandelt", Leipzig 1845 bis 1846) und die entwickelungsgeschichtliche Betrachtungsweise allein gelten ließ. Seine Einzelleistungen lassen oft Selbstkritik vermissen; genannt seien die „Beiträge zur Phytogenesis" (1838), in der er zuerst seine Zellbildungstheorie entwickelte, die neben meist Verfehltem den Fortschritt brachte, daß der bisher vernachlässigte Zellkern zu seinem Rechte kam. Seine Lehre von der Befruchtung der höheren Pflanzen, nach welcher der Embryo unmittelbar aus dem Ende des Pollenschlauches entsteht, wurde sehr bald durch Amici widerlegt. Seit 1850 hat er fast nur noch populäre Schriften veröffentlicht.

Literatur. *Sachs, Geschichte der Botanik (München 1875). — Behrens, Botanisches Centralblatt, 7 (1881), S. 150 bis 156 und 188 bis 190 (dort ein Schriftenverzeichnis).*

W. Ruhland.

Schleimpilze.

1. Die Acrasieen. 2. Die typischen Myxomyceten oder Myxogasteres. 3. Die Phytomyxinae. 4. Verwandtschaftsverhältnisse der Myxomyceten.

Die Schleimpilze oder Pilztiere, Myxomyceten oder Mycetozoen sind Organismen, die an der Grenze zwischen Pflanzen- und Tierreich stehen und die daher gewöhnlich ihre Darstellung sowohl in botanischen wie in zoologischen Lehrbüchern finden. Ihr Vegetationskörper besteht aus einem Plasmodium, d. h. einer aus der Verschmelzung oder Anhäufung von Amöben hervorgehenden nackten Protoplasmamasse von veränderlicher Kontur. Diese zerfällt dann in Sporen, die bei ihrer Keimung wieder Amöben oder Schwärmer entlassen. Die Gruppen, welche man gewöhnlich hier vereinigt, sind vielleicht in ihren Verwandtschaftsverhältnissen nicht einheitlich und sollen daher auch im folgenden getrennt behandelt werden. Es sind das:

1. Die Acrasieen oder Sorophoreen. Das Plasmodium ist hier ein sogenanntes Aggregatplasmodium: es besteht aus mehr oder weniger zahlreichen Amöben, die sich angesammelt haben, aber ohne miteinander zu verschmelzen. Die hierhergehörenden Formen leben auf faulenden organischen Substanzen, besonders auf Mist. Aus der Spore tritt bei der Keimung der Inhalt in Form eines nackten Protoplasmakörpers aus (Fig. 1), der nach Art der Amöben seine Kontur verändern oder feine Fortsätze (Pseudopodien) ausstrecken und einziehen kann. Diese Myxamöben können sich durch Zweiteilung ausgiebig vermehren (Fig. 1); dann vereinigen sie sich zum Plasmodium, in welchem man

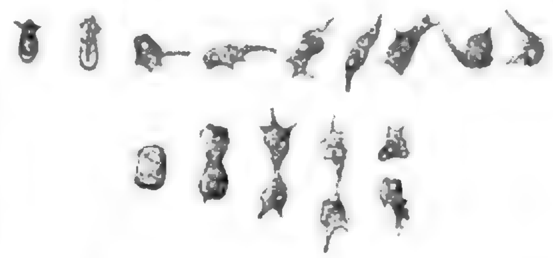


Fig. 1. Polysphondylium violaceum, Sporenkeimung, Myxamöben und deren Teilung. Nach Brefeld.

aber bei genauerer Untersuchung oder bei Druck mit dem Deckglas immer die einzelnen Amöbenindividuen erkennen kann. Schließlich entstehen kleine Fruchtkörper: bei Guttulina und Guttulinopsis geschieht das in der Weise, daß das Aggregatplasmodium sich als Klümpchen oder keulenförmiges Gebilde über das Substrat erhebt, dann runden sich die einzelnen Amöben, aus denen es zusammengesetzt ist, ab, umgeben sich mit Membran und werden so zu Sporen. Etwas weitergehende Gliederung der Fruchtkörperchen zeigen Dictyostelium und Polysphondylium: die Amöben des Plasmodiums kriechen von allen Seiten nach einem zentralen Punkte zusammen (Fig. 2), wo sie sich stark anhäufen und sich über das Substrat erheben (Fig. 3, A). Diejenigen Amöben nun, welche in der Achse dieser Ansammlung liegen, schwellen an, umgeben sich mit einer Membran und indem sie untereinander in feste Verbindung treten, bilden sie eine feste zylindrische Säule (St.). Dieser entlang kriechen nun auch die übrigen Amöben (am) des Plasmodiums (Pl) in die Höhe, und in dem Maße wie das geschieht verlängert sich die Säule (Fig. 3, B) nach oben oder es können auch seitliche Auszweigungen derselben gebildet werden (Fig. 3, C). Schließlich sammeln sich alle nicht verwendeten Amöben am Scheitel dieses Stieles oder seiner Verzweigungen zu einem kugeligen Haufwerke (Fig. 3, D in Sp.) an und runden sich zu Sporen ab. Ein solcher Fruchtkörper wird auch Sorophor genannt.

2. Die Myxogasteres oder typischen Myxomyceten. Im Gegensatz zu den Acrasieen werden bei den Myxogasteres echte oder Fusionsplasmodien gebildet, in denen man einzelne Amöben nicht unterscheiden kann. Der bei der Keimung der Spore aus der Membran austretende Protoplasmakörper nimmt sofort oder nach kurzem amöbenartigem Zustand, als Ganzes oder nach erfolgter Teilung, die Gestalt von Schwärmern

(Myxomonaden, Myxoflagellaten) an (Fig. 4). Diese haben meist eine verlängerte Gestalt, tragen an ihrem vorderen Ende eine Geißel, unter deren Ansatzstelle der Zellkern (K) liegt, während am hinteren Ende 1 bis 3 Vakuolen (V) auftreten, von denen wenigstens eine zu den sogenannten pulsierenden gehört. Bei Austrocknung runden sich die Schwärmer ab, umgeben sich mit einer dünnen Membran und stellen so vorübergehende Ruhezustände dar, die man Mikrocysten nennt.

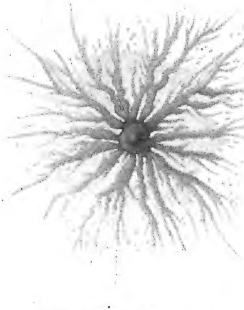


Fig. 2. Polysphondylium violaceum. Aggregatplasmodium, Anfang der Ansammlung im Mittelpunkt. Nach Brefeld.

Bald früher bald später gehen dann die Myxomonaden unter Verlust ihrer Geißel und unter Bildung von Pseudopodien in den amöbenartigen Zustand über, man nennt sie nun Myxamöben. Sowohl in diesem Zustande als auch im vorangehenden Schwärmerzustande erfolgt eine ausgiebige Vermehrung durch Zweiteilung. Es findet auch Aufnahme von festen Körperchen, Bakterien usw. in das Protoplasma statt (Fig. 4, H). — Zwischen den Myxamöben erfolgt nach neueren Untersuchungen der Sexualakt: sie verschmelzen unter Kopulation ihrer Kerne paarweise zu kleinen Plasmodien. Diese enthalten anfänglich einen diploiden Kern; durch Teilung desselben werden sie mehrkernig, dann vielkernig Damit Hand in Hand geht eine Größenzunahme, wobei auch vielfach unkopuliert gebliebene Myxamöben. Bakterien usw. aufgenommen und in besonderen Vakuolen (Verdauungsvakuolen) verdaut werden. In Objektträgerkulturen beobachtet man auch das Zusammenfließen kleiner Plasmodien zu größeren. Ebenso wie die Schwärmer, so können auch die jungen Plasmodien bei Wassermangel in Ruhezustände übergehen, in diesem Falle durch

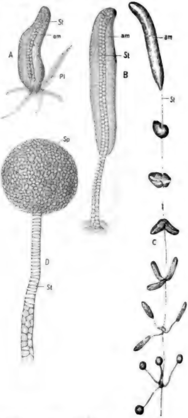


Fig. 3. Polysphondylium violaceum. Entwickelung des Sorophors. Nach Brefeld.

Zerfall in derbwandige kugelige Zellen (Makrocysten, derbwandige Cysten).

Die erwachsenen Plasmodien stellen bald winzig kleine Plasmaklümpchen, bald weitausgebreitete, reichverästelte, milchweiß, gelb oder anders gefärbte Stränge (Fig. 5)

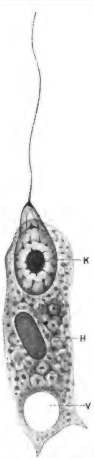


Fig 4. Myxomonade. K Zellkern, V pulsierende Vakuole, H von der Myxomonade aufgenommener Fremdkörper (hefeartige Zelle). Vergrößerung 4000. Nach Jahn.



Fig. 5. Plasmodium von Fuligo varians auf Fließpapier kriechend. Nach Jost.

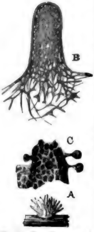


Fig. 6. Ceratiomyxa. A Fruchtkörper, ca. 2 mal vergr., B u. C Entwickelung des Fruchtkörpers stärker vergr. Nach Famintzin und Woronin.

von rahmartiger Konsistenz dar, welche das Substrat (faulende Pflanzenteile wie Laub, Lohe, Holz usw.) nach allen Richtungen durchziehen. Sie lassen eine hyaline Außenschicht und ein inneres körniges Plasma (Körnerplasma) mit zahlreichen Kernen unterscheiden, das sich in steter strömender Bewegung befindet. Durch Einziehen und Vorstrecken von Fortsätzen verändert dabei das Plasmodium auch seinen Ort, wobei die Richtung dieser Bewegungen durch äußere Reize (Licht, Feuchtigkeitsverteilung, Nahrungszufuhr usw.) bestimmt wird (s, die Artikel „Bewegungen der Pflanzen" und „Reizerscheinungen"). Vertrocknet das Substrat oder tritt Kälte ein, so verwandeln sich die Plasmodien in sogenannte Sklerotien: sie ziehen ihre Fortsätze ein, erhärten zu einer horn- oder wachsartigen Masse, die durch Membranen in zahlreiche rundliche oder polyedrische Zellen gefächert ist.

Sporenbildung. Wenn das Plasmodium zur Sporenbildung übergeht, so tritt es an die Oberfläche des Substrates und bildet hier Fruchtkörper. Diese lassen zwei verschiedene Typen auseinanderhalten:

a) Exospore Myxogasteres, repräsentiert durch die Gattung Ceratiomyxa. Das Plasmodium erhebt sich hier in Form kleiner zylindrischer Säulchen (Fig. 6A) oder wabenartig verbundener Plättchen über das

Substrat. Die Oberfläche dieser Fruchtkörperchen besteht aus einer dünnen gallertigen Hautschicht. An der Innenseite der letzteren breitet sich das Körnerplasma in Form einer maschenartig-netzigen Schicht aus (Fig. 6B). Kurz vorher ist die Reduktionsteilung der Kerne erfolgt, von denen aber viele degenerieren. Hierauf zerfällt das Körnerplasma in eine Lage von zahlreichen scharf abgegrenzten polygonalen Portionen mit je einem (nun haploiden) Kern (Pflasterstadium; Fig. 6C). Jede dieser Portionen wölbt sich nun mitsamt der bedeckenden Gallerte zu einem stielartigen Fortsatze nach außen vor, an dessen Spitze sich schließlich das Körnerplasma kugelig ansammelt (Fig. 6C) und mit einer festen Membran umgibt. Schließlich besteht der ganze Fruchtkörper nur noch aus einer farblosen Gallerte, von der zahlreiche ebenfalls farblos-gallertige Stielchen abgehen, auf deren Spitze membranumgebene Sporen sitzen und sich bald ablösen.

b) Endospore Myxogasteres. In dieser viel zahlreicheren Gruppe entstehen am Plamodium lokale Plasmaansammlungen, die zu Sporenbehältern (Sporangien) werden, indem sie an ihrer Oberfläche eine Haut (Peridie) ausscheiden, während im Innern das Protoplasma in zahlreiche membranumgebene Sporen zerfällt. Dieser letztere Vorgang ist ein Zerklüftungsvorgang ähnlich demjenigen, welcher sich im Sporangium der Phykomyceten (s. den Artikel „Fortpflanzung der Pilze") abspielt; aber während desselben erfolgt eine Reduktionsteilung der Zellkerne, so daß schließlich die Sporenkerne wieder haploid sind. — Die Gestalt der Sporangien ist eine sehr mannigfaltige: Mitunter lassen sie noch mehr oder weniger die Form der Plasmodien erkennen, aus denen sie hervorgegangen sind: sie stellen auf dem Substrate ausgebreitete, zuweilen auch anastomosierende Röhren dar, die man Plasmodiocarpien nennt. Meistens aber erheben sie sich als kleine, kugelige, birn- oder keulenförmige oder zylindrische, sitzende oder gestielte Körperchen (Fig. 7A, 8A) über das Substrat, oft in großer Zahl auf den Resten des Plasmodiums, dem sogenannten Hypothallus, beisammenstehend. Endlich können die aus einem Plasmodium hervorgehenden Sporangien auch dicht miteinander verbunden oder verflochten sein, mitunter derart, daß man im reifen Zustande ihre gegenseitige Abgrenzung nicht mehr erkennt. In diesen Fällen spricht man von Aethalien. Bei der sogenannten Lohblüte, Fuligo septica, bilden dieselben z. B. gelbliche, kuchenartige Massen von mehreren Zentimetern Ausdehnung. — Außer den Sporen enthält das Sporangium oft noch sogenannte Capillitiumfasern oder Elateren. Es sind das zwischen den Sporen verlaufende, frei endigende oder anastomosierende, hohle oder kompakte, oft mit charakteristischen Skulpturen (Schraubenleisten,

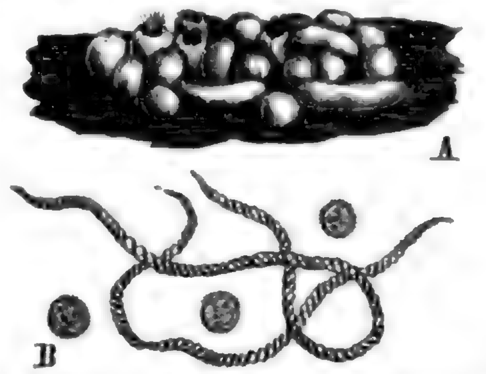


Fig. 7. Trichia varia. A Sporangien 5mal vergr., B Capillitiumröhren und Sporen. Nach Schröter.

Stacheln) besetzte fadenartige Bildungen (Fig. 7B). Bei manchen Arten setzen sie sich an die Peridie an oder entspringen an einer axilen Säule (Columella), die sich nach unten in den Stiel des Sporangiums fortsetzt (Fig. 8B, C). Im Capillitium sowie in der Peridie findet man häufig Kalkeinlagerungen. Sehr mannigfaltig sind die Färbungen der Sporangien, Capillitien und Sporen; besonders häufig sind sie gelb, rot oder schwarzbraun. Bei der Reife wird die

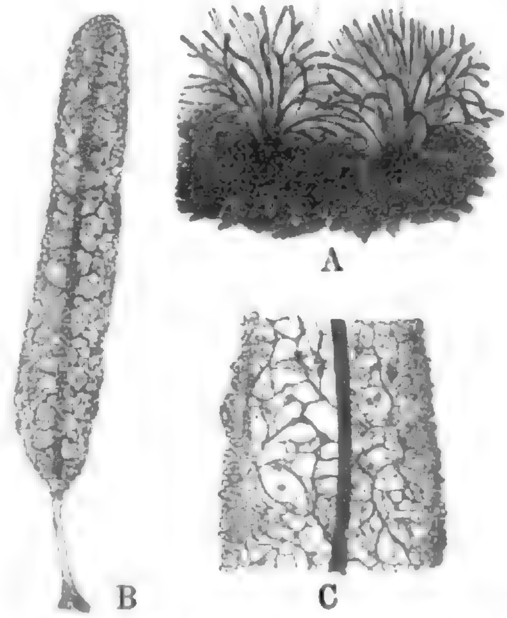


Fig. 8. Stemonitis fusca. A Sporangien, nat. Gr., B, C Columella und Capillitium nach Zerfall der Peridie. Nach Schröter und de Bary.

Peridie aufgerissen oder deckelartig geöffnet oder sie zerfällt; bei den Formen mit Columella bleibt letztere mit den Capillitiumfasern als zierliches feder- oder bäumchenartiges Gebilde zurück (Stemonitis

[Fig. 8], Comatricha u. a.). In den Gattungen Dictydium und Cribraria wird die Peridie gitterartig durchbrochen (Fig. 9).

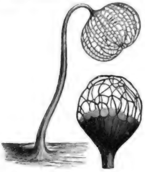


Fig. 9. A Cribraria rufa, B Dictydium cernuum. Gitterig durchbrochene Peridie. Nach Rostafinski und Schröter.

3. Die Phytomyxinae oder Plasmodiophoraceen. Es handelt sich hier um parasitisch lebende Formen, deren Sporen nicht an besonderen Fruchtkörperbildungen auftreten sondern einfach in den Zellen des Wirtes eingeschlossen sind.

Als Typus dieser Gruppe gilt Plasmodiophora Brassicae, die auf Kohl und verwandten Pflanzen auffällige Wurzelanschwellungen hervorbringt, welche man als Kohlkropf oder Kohlhernie bezeichnet (vgl. den Artikel „Pflanzenkrankheiten" Fig. 10). Aus den keimenden Sporen gehen Schwärmer hervor, die in den Wirt eindringen und nun als Myxamöben in dessen Protoplasma leben. Ihre Gegenwart schadet dem Wirte zunächst nicht, sondern regt seine Zellen zur Teilung und Vergrößerung an, wodurch die erwähnten Geschwülste entstehen. Diese Amöben teilen nun ihre Kerne mehrfach, wodurch sie mehrkernig werden, und vermehren sich anscheinend durch Abschnürung von Fortsätzen. Man bezeichnet sie in diesem Entwickelungsstadium als Schizonten und die abgeschnürten Tochteramöben als Meronten. So kommt es, daß die Zellen des Wirtes oft eine größere Zahl von mehrkernigen Amöben enthalten (Fig. 10, a). Zuletzt zehren diese doch das Protoplasma der Nährzellen auf und bilden in denselben einen zusammenhängenden protoplasmatischen Körper (Fig. 10, b, c), der nach den einen Forschern ein echtes Fusionsplasmodium darstellt, während nach den anderen die Individualität der einzelnen Amöben (die zur Zeit der Sporenbildung Sporonten genannt werden) bis zuletzt erhalten bleibt. Es folgen nun weitere Kernteilungen und schließlich Zerfall in eine Menge von einkernigen Portionen (Fig. 10, d, e), die sich als Sporen mit Membran umgeben (Fig. 10, f) und durch Verfaulen der Kropfgeschwülste wieder in den Boden gelangen.

An Plasmodiophora werden nun in neuerer Zeit mehrere parasitische Organismen von ähnlichem Entwickelungsgang angeschlossen, für die es aber feststeht, daß eine Verschmelzung der Schizonten nicht stattfindet, also auch keine echten Plasmodien vorliegen. Hierher gehört Sorosphaera Veronicae in Anschwellungen der Stengel usw. von Veronicaarten, bei der die reifen Sporen zu hohlkugeligen Gruppen angeordnet sind, ferner Tetramyxa parasitica, deren Sporen in den Zellen von Tumoren an Ruppia und Zannichellia kleine Vierergruppen bilden. Andere Formen verursachen an ihren Wirten keine Anschwellungen, so Ligniera Junci (in den Wurzeln von Juncus) u. a. Endlich hat man hierher auch die Gattungen Sporomyxa und Mycetosporidium gestellt, die in Käfern parasitieren.

4. Verwandtschaftsverhältnisse der Myxomyceten. Für die Myxogasteres, deren Entwickelungsgang auch hinsichtlich

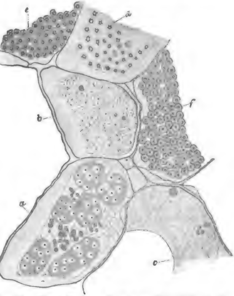


Fig. 10. Plasmodiophora Brassicae. Entwickelung des Parasiten in den Zellen der Wirtspflanze. Nach Nawaschin.

der Kerne heute am vollständigsten bekannt ist, ergeben sich als nächste Verwandtschaftsbeziehungen diejenigen zu den Rhizopoden und spezieller zu den Heliozoen, unter denen Actinophrys Sol auch in bezug auf das Verhalten der Kerne einen ähnlichen Kreislauf aufweist. Indessen erweisen sich die Myxogasteres „durch ihre Organisation und Entwickelungsgeschichte als nicht niedrig stehende, vielmehr hochdifferenzierte Organismen, welche in manchen Beziehungen die Grenze des Protozoenreiches überschreiten". — Die Phytomyxinae wurden, solange man ihre Plasmodien als Fusionsplasmodien ansah, als typische Myxomyceten angesehen, die infolge ihrer parasitischen Lebensweise vereinfacht sind. Von neueren Autoren wird jedoch ihre nähere Beziehung zu den Myxogasteres bestritten und z. B. eher eine Verwandtschaft mit Chytridineen wie Woronina (s. den Artikel „Pilze") angenommen. Noch von anderer Seite wird darauf hingewiesen, daß sie stark an gewisse Sporozoen erinnern. — Auch für die Acrasieen wird in neuerer Zeit die nähere Verwandtschaft mit den Myxogasteres in Abrede gestellt.

Literatur. *Abgesehen von den in der Pilz- und Protozoenliteratur enthaltenen Darstellungen der Myxomyceten seien hier noch folgende speziellere Bearbeitungen erwähnt:* **A. de Bary**, *Die Mycetozoen (Schleimpilze), 2. Aufl. Leipzig 1864.* — **W. Zopf**, *Die Pilztiere oder Schleimpilze in Schenks Handbuch der Botanik III, 2, 1885.* — **A. Lister**, *A monograph of the Mycetozoa. 2nd edition revised by G. Lister. London 1911.* — **H. Schinz**, *Myxogasteres in L. Rabenhorsts Kryptogamenflora von Deutschland, Oesterreich und der Schweiz, Ed. 2, Pilze, X. Abt., 1912 f..* — *Die Abbildungen sind teils aus den betreffenden Originalarbeiten, teils aus* **Doflein**, *Protozoen, und* **Engler-Prantl**, *Natürliche Pflanzenfamilien, entnommen.*

Ed. Fischer.

Schleppung.

Die Umbiegung von Gesteinsschichten an Verwerfungen. Der tiefer liegende Teil ist nach oben, der höher liegende nach unten geschleppt, entsprechend der der Verwerfung vorausgehenden Biegung (vgl. die Artikel „Lagerungsform der Gesteine" und „Schichtenbau").

Schlieren.

Unregelmäßige Ungleichheiten in der chemischen Zusammensetzung, im spezifischen Gewicht, in den Brechungsexponenten bei Flüssigkeiten, so z. B. wenn man Zuckerlösung und Wasser unvollkommen durchrührt. Dementsprechendes auch bei natürlichen und künstlichen Gläsern und von da aus übertragen auf kristallisierte Laven oder Gesteine.

Schlierenmethode.

1. Einleitung. Die Bezeichnung „Schlieren" wurde ursprünglich nur auf die in Glasflüssen auftretenden Stellen mit einer im Vergleiche zur übrigen Glasmasse etwas verschiedenen optischen Dichte (einem verschiedenen Brechungsexponenten) angewendet. Durch solche Schlieren in Glaslinsen bei Fernrohren und dergleichen wird die Schärfe der erhaltenen Bilder stark beeinträchtigt. Nach dem Vorgange von A. Toepler werden heute ganz allgemein unter Schlieren diejenigen Stellen in einer sonst homogenen Grundsubstanz irgendwelcher Art (fest, flüssig oder gasförmig) verstanden, deren Brechungsexponent von dem der Grundsubstanz abweicht.

Ist die optische Dichtenabweichung einer Schliere von der Umgebung sehr groß, so kann man deren Existenz in verschiedenster Weise nicht allzu schwer bemerken; z. B. bei schiefer Beleuchtung, bei Betrachtung einer Grenze von hell und dunkel oder eines lamellierten Hintergrundes durch die zu untersuchende Masse hindurch, usw. Ein äußerst empfindliches Mittel, um auch von allerfeinsten Schlieren ein getreues Abbild zu erlangen, wurde von August Toepler 1864 durch seine berühmte „Schlierenmethode" gegeben.

2. Prinzip der Beobachtungsmethode. Es sei dieses hier mit den Worten des Erfinders auseinandergesetzt: „Das Fundament, auf welchem die in Rede stehende Methode beruht, ist ein äußerst einfaches der Theorie nach. Stellen wir uns unter a (Fig. 1) einen helleuchtenden Punkt, vorläufig ohne räumliche oder Flächenausdehnung vor, es sei ferner L eine Konvexlinse von recht großer Brennweite und Oeffnung, welche die von a ausgehenden Strahlen in b vereinigt, so wird man von der entgegengesetzten Seite her ein in der Linsen-Achse befindliches Auge O leicht so nahe an den Punkt b heranbringen können, daß die von b aus wieder divergierenden Strahlen sämtlich durch die Pupille hindurch auf die Netzhaut gelangen können (in der Figur ist der Deut-

lichkeit halber auf das wahre Verhältnis der Dimensionen keine Rücksicht genommen worden). Hat der Beobachter das Auge gleichzeitig so akkommodiert, wie es der Entfernung von O bis L entspricht, so wird auf der Netzhaut ein deutliches Bild mn der Linse L entstehen müssen, welches durch die von a ausgehenden Strahlen vollkommen und gleichmäßig erleuchtet erscheint. hc stellt eine gradlinig begrenzte, undurchsichtige Scheidewand dar, welche wir vorläufig als nicht vorhanden betrachten wollen.

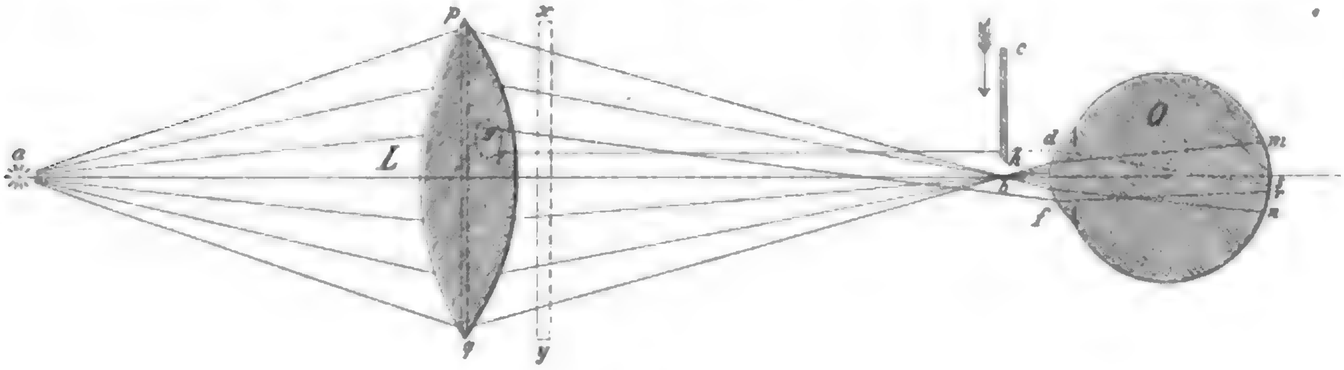


Fig. 1.

Befindet sich nun im Innern der Linse bei gi etwa eine kleine Partie von beliebiger Gestaltung, deren Brechungsvermögen nur um Geringes von dem der Glasmasse abweicht, kurz eine Schliere, so werden die betreffenden Lichtstrahlen nicht genau in b eintreffen, sondern in der Nähe von b vorbeigehen, um ins Auge zu gelangen. Die unregelmäßig gebrochenen Strahlen, beispielsweise gf und id, werden aber dennoch an der Stelle rs des Netzhautbildes anlangen, welche der Schliere ig entspricht, weil ja das Auge für die Entfernung der Linse akkommodiert ist. Der Beobachter wird also trotz der unregelmäßigen Strahlenbrechung das Gesichtsfeld gleichmäßig erhellt sehen, falls das Diaphragma hc nicht vorhanden ist. Schiebt man dieses jedoch in der durch den Pfeil angedeuteten Richtung bis nahe zum Punkte b vor, so gibt es eine Stellung, bei welcher gewisse irreguläre Strahlen (id) abgeblendet werden. Dann muß in dem gleichmäßig erhellten Gesichtsfelde mn eine dunkle Lücke s entstehen. In der Tat bemerkt man auf diese Weise im allgemeinen eine schwarze Zeichnung der Schliere auf hellem Grunde.

Rückt das Diaphragma hc noch weiter vor, so daß der Sammelpunkt b gerade selbst abgeblendet wird, so muß das Gesichtsfeld plötzlich dunkel werden. Dann gelangen aber noch andere irreguläre Strahlen (gf) unterhalb b ins Auge und erzeugen im allgemeinen bei dieser Stellung des Diaphragmas ein helles Bild der Schliere auf dunklem Grunde.

Es ist nun einleuchtend, daß die letztere Anordnung, bei welcher b durch den scharfen Rand h des Diaphragmas abgeblendet wird, die empfindlichste Stellung zur Sichtbarmachung der Schlieren ist. Das erstere dunkle Bild auf hellem Grunde entgeht leicht der Beobachtung, weil sich bei intensiv beleuchtetem, großem Sehfelde die Empfindlichkeit der Retina zu sehr abstumpft, während man hell auf dunklem Gesichtsfelde die zartesten Schlieren mit Leichtigkeit erkennt.

Der Augenblick, in welchem das allmählich vorgeschobene Diaphragma gerade den Bildpunkt b erreicht, kennzeichnet sich beim Versuche sehr leicht dadurch, daß das helle Gesichtsfeld sich plötzlich verdunkelt, und zwar tritt die Verdunkelung in allen Teilen des Sehfeldes gleichzeitig und gleichstark auf (natürlich von etwaigen Schlieren abgesehen). Passiert das Diaphragma nicht genau den Bildpunkt b, sondern geht um geringes vor demselben vorüber, wie etwa in Stellung a Fig. 2, so wird das Auge eine

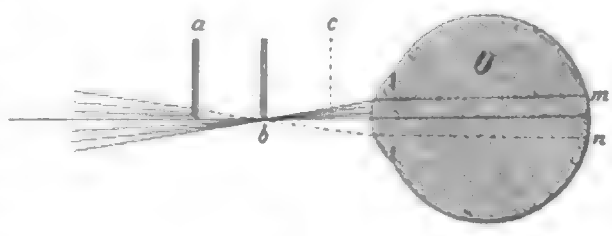


Fig. 2.

partielle Verdunkelung im Bilde mn erkennen. Hat die Diaphragmenkante die optische Achse erreicht, so ist das Gesichtsfeld halb hell, halb dunkel, und zwar dunkel auf der dem Schirme entgegengesetzten Seite. Das Umgekehrte tritt ein, wie sich leicht übersehen läßt, wenn das Diaphragma zwischen b und dem Auge steht. Beide Stellungen sind zur Schlieren-Erkennung nicht brauchbar. Die empfindliche Stellung ist nur die, bei welcher das Diaphragma gerade durch b hindurchgeht. Der Kürze halber wollen wir für diese

Stellung des Diaphragmas ein für alle Male die Bezeichnung „empfindliche Einstellung“ beibehalten.

Obgleich sich bei der praktischen Ausführung des Versuches manches ganz anders herausstellt, als es obige theoretische Erörterung lehrt, so wird man doch schon aus der Anordnung in Figur 1 erkennen:

1. daß die Schlieren im Innern der Linse L es nicht allein sind, welche dem Auge bei der obigen empfindlichen Einstellung sichtbar werden. Den Gang der Strahlen in der Nähe von b beeinflußt ja ebensosehr die Beschaffenheit des durchsichtigen Mediums, der Luft also, welche sich vor und hinter der Linse L in Figur 1 zwischen a und b befindet. Da nun O für die Entfernung OL (beiläufig 15 bis 25 Fuß betragend) akkommodiert ist, so wird es auch für die Luftschichten nahe vor und hinter der Linse hinreichend akkommodiert sein, um in denselben partielle Veränderungen des Brechungsindex gerade wie die Schlieren im Glase in wahrer Form und Größe zu erblicken. Desgleichen wird man, wenn L als schlierenfrei vorausgesetzt ist, in einer vor (oder hinter) die Linse gestellten planen Glasplatte xy, einer Flüssigkeit in einem Gefäß mit durchsichtigen, planen Wänden, jede Ungleichförmigkeit im Brechungsvermögen direkt wahrnehmen. Der Kürze halber soll in der Folge der Name „Schliere“ für alle derartige Ungleichförmigkeiten im optischen Verhalten einer sonst homogenen Grundmasse beibehalten werden, beziehe er sich nun auf feste, flüssige oder gasförmige Medien.

2. Nicht allein solche Schlieren wird das Auge direkt wahrnehmen. Auch jeden Fehler im Schliff der Linsenflächen bei L wird man in ähnlicher Zeichnung (hell auf dunkel oder umgekehrt) erblicken. Desgleichen Oberflächenveränderungen auf planen Platten, welche sich dicht vor, oder hinter L befinden.

3. Es ist darauf aufmerksam zu machen, daß für eine gewisse Einstellung des Diaphragmas hc ausnahmsweise dennoch Schlieren denkbar sind, welche durch das Auge nicht bemerkt werden können, und zwar, wie sich leicht einsehen läßt, nur in einem einzigen Falle.

Die obige Erörterung bezog sich auf irreguläre Strahlen, welche in einer zur Diaphragmenkante h senkrechten Ebene abgelenkt werden. Gesetzt es befinde sich in der Linse L eine Schliere, welche in Form eines Fadens von zylindrischem Querschnitt in der Richtung von p nach q (Fig. 1) verläuft, so wird dieser Faden offenbar nur Ablenkungen rechtwinkelig zu seiner Achse, also stets in solchen Ebenen bewirken, welche zur Kante h parallel sind. Bei der Anordnung Figur 1 wird in diesem Falle, selbst für den Augenblick der empfindlichen Einstellung, die Schliere nicht sichtbar werden.

Um also aller Schlieren ansichtig zu werden, welche in der Linse selbst, oder auch in den dicht vor oder hinter der Linse befindlichen durchsichtigen Medien aufgesucht werden sollen, bleibt nichts anderes übrig, als das Diaphragma um den Punkt b herum, in einer zur optischen Achse ab senkrechten Ebene zu drehen, und dasselbe in verschiedenen Lagen bis zur empfindlichen Einstellung vorzuschieben. Im allgemeinen genügt es schon zur Erkennung aller Schlieren, die Kante h in nur zwei zueinander rechtwinkeligen Lagen einzustellen.“

3. Spezielle Versuchsanordnungen für die Toeplersche Schlierenmethode. Anstelle des Lichtpunktes a kann man irgendeine Lichtquelle benutzen, welche bei b ein scharf begrenztes Bild gibt. Die gebräuchlichen Lichtquellen besitzen nun meist unscharfe und auch unstete Begrenzungen. Zur vollen Ausnutzung der möglichen Empfindlichkeit der Schlierenmethode ist vor solchen Lichtquellen ein ebener Abblendschirm mit scharf begrenztem Ausschnitte anzubringen, wie z. B. in Figur 3 der Schirm S mit einem

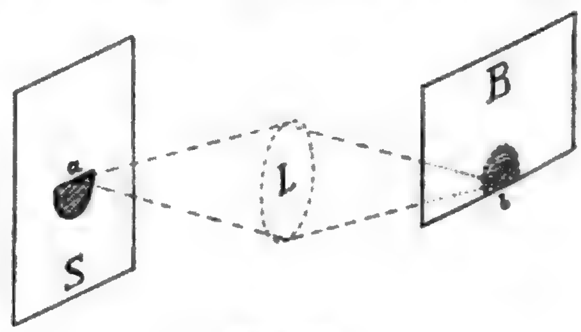


Fig. 3.

halbkreisförmigen Loche; die Blende B ist dann so aufzustellen, daß das Bild des Ausschnittes soeben voll abgeblendet wird.

Anstelle der einfachen Linse L in Figur 1 ist ein möglichst gutes achromatisches Linsensystem, ein Fernrohrobjektiv oder dergleichen, zu wählen.

Die Erläuterung des Prinzips der Methode (Fig. 1) nimmt subjektive Beobachtung — mit dem Auge — an. Hierbei stört leicht die unruhige Lage der Pupillenbegrenzung, welche bei falscher Augenlage als weitere Blende wirken kann. Eine Linse anstelle des Auges gibt auf einem Schirm, welcher in einer zu x y konjugierten Lage aufgestellt ist, ein objektives Bild der Schlieren in x y. Ersetzt man das Auge durch einen auf das Gebiet x y eingestellten photographischen Apparat, so erhält man Photogramme der Schlieren in x y. Am weitesten läßt sich die Wahrnehmungsempfindlichkeit und

Präzision treiben, wenn man anstelle des Auges zunächst ein auf die Ebene x y eingestelltes Fernrohr (für geringere Ansprüche genügt ein Opernglas) aufstellt und durch dieses subjektiv beobachtet.

Der für Schlierenbeobachtung nutzbare Raum ist bei der in Figur 1 angegebenen Anordnung durch die Ausdehnung der Linsen L begrenzt. Große achromatische Linsensysteme sind sehr kostspielig. Man kann ihre Anwendung umgehen, indem man statt L einen Hohlspiegel verwendet. Das abzublendende Bild des Lichtpunktes a oder seines Ersatzes liegt dann auf der gleichen Seite wie a. Sollen die Lichtstrahlen den Schlierenraum x y auf dem Wege von a über den Spiegel zum Blendenorte b jetzt nicht doppelt durchlaufen, was zu unklaren, unbrauchbaren Bildern führt, so muß a seitlich von der Spiegelachse aufgestellt werden. Der zu untersuchende Raum x y ist dann an eine Stelle zu legen, wo Hin- und Rückstrahlung sich nicht durchkreuzt. Die Aufnahme der Schlieren um fliegende Geschosse herum wie z. B. in Figur 6 erfolgt in dieser Weise.

Im einzelnen wird man sich mit der Dimensionierung und speziellen Ausführung den jeweiligen Umständen und Zwecken anzupassen haben. Hervorgehoben sei allgemein, daß das wesentliche der Toeplerschen Schlierenmethode, die durch Anwendung einer Blende an richtiger Stelle — durch die „empfindliche Einstellung" — ermöglichte getreue Abbildung von Schlieren ist.

4. Empfindlichkeit der Methode. Es ist leicht ersichtlich, daß unter sonst gleichen Verhältnissen die Empfindlichkeit der Methode, d. h. der reziproke Wert des relativen Unterschiedes des Brechungsexponenten einer Schliere gegenüber dem der Grundmasse, welcher nötig ist, um die Schliere soeben noch sichtbar werden zu lassen, um so größer ist, je größer der Abstand der Schlierenebene x y von der richtig eingestellten Blende ch ist. Welche Umstände sonst noch von Einfluß auf die Empfindlichkeit sind oder sein können, ist in den Arbeiten Toeplers nachzulesen.

In quantitativer Hinsicht genüge zur Charakterisierung der hohen Empfindlichkeit die Angabe Toeplers, daß bei guter Justierung eine Schliere noch mit Leichtigkeit sichtbar zu machen ist, deren Brechungsexponent von dem der Grundmasse nur um ein Millionstel abweicht.

5. Schlierenbeobachtung beim Mikroskop. Auch auf Beobachtungen mit dem Miskroskop läßt sich die Schlierenmethode anwenden. In Figur 4 sei eine Originalfigur aus der hier grundlegenden Arbeit Toeplers vom Jahre 1866 abgedruckt. Es bedeutet: cf die Objektivlinse des Mikroskopes; C das Kollektiv-, O das Okularglas eines Campanischen Okularsystems; AA den Beleuchtungsspiegel; BB eine Blende mit der kleinen Oeffnung cd. Diese Blende entspricht der Blende S der Fig. 3. Es hat dann die letztgenannte Blendenöffnung zwei

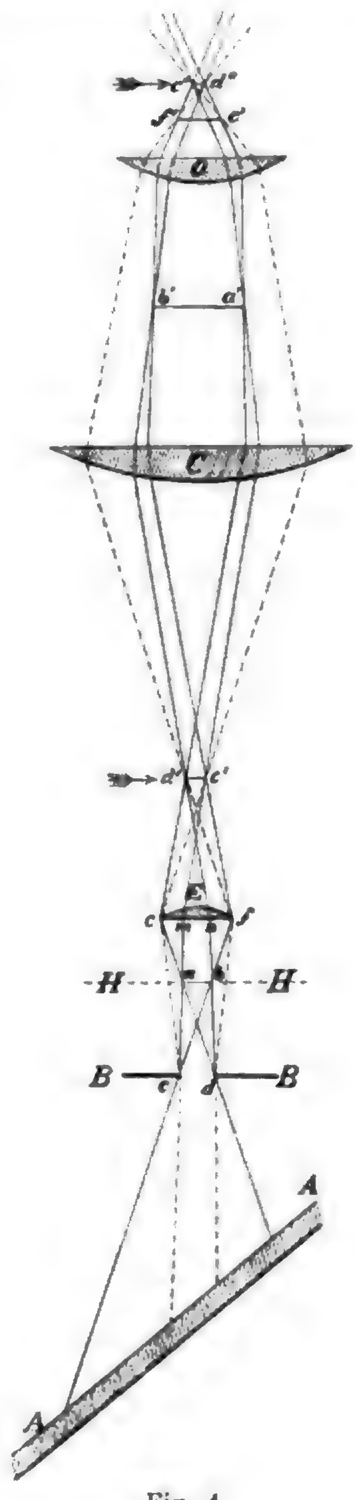


Fig. 4.

reelle Bilder d'c' und c''d''. In der Bildebene HH sei eine Schliere im Gebiete zwischen a und b vorhanden. Ihr Bild liegt zwischen b' und a'.

Um die Schliere sichtbar zu machen,

genügt es, daß man entweder das erste Blendenbild d'c' oder das zweite Blendenbild c''d'' durch einen undurchsichtigen seitlichen Schieber (den Pfeil in der Figur) abblendet. Die erstere Schieberordnung ist aus einer Reihe in der genannten Arbeit ausführlich diskutierten Gründen vorzuziehen.

6. Die Schattenmethode für Schlierenbeobachtung (Dvorschak 1880). Eine möglichst punktförmige, möglichst helle Lichtquelle (z. B. freistehendes Bogenlicht) beleuchtet einen weißen Schirm. Schlieren zwischen Lichtpunkt und Schirm werden auf dem Schirme sichtbar.

Diese Methode hat gegenüber der Toeplerschen die Einfachheit und das große Gesichtsfeld voraus — dem stehen prinzipielle Mängel gegenüber. Jede Schliere veranlaßt bei der Schattenmethode — erstens einen Schatten, welcher an geometrisch bestimmter Lage, auf der Verlängerung der Verbindungslinie von Lichtpunkt und Schliere, auftritt, also ein Schattenbild der Schliere gibt — zweitens einen abgelenkten Lichtfleck, dessen Lage und Gestalt außer von der Lage der Schliere auch noch von der Verteilung und Stärke der von der Umgebung abweichenden optischen Dichte der Schliere abhängt, also kein Bild der Schliere gibt. Schon in relativ einfachen Fällen von Schlierenverteilung im Raume stören die Lichtflecke das Schattenbild stark, das auf dem Schirme erscheinende Gesamtbild ist demnach meist so komplizierter Natur, daß nur ausnahmsweise ein sicherer Rückschluß von ihm auf die Stelle und Natur der Schlieren möglich ist, und von einem Bilde der Schlieren keine Rede sein kann. Ferner ist zu bemerken, daß bei der Dvorschakschen Methode Schatten und Lichtflecke auf einer hellen Gesamtfläche erscheinen, die Empfindlichkeit für kleinste Dichteunterschiede also diejenige der Toeplerschen Schlierenmethode bei weitem nicht erreichen kann.

7. Anwendungen der Schlierenmethode. Das Anwendungsgebiet der Schlierenmethode umfaßt alle die experimentellen Aufgaben, bei denen es darauf ankommt, innerhalb einer Umgebung von gleichmäßiger optischer Dichte Gebiete mit kleinster optischer Dichteabweichung zu erkennen. Solche Aufgaben treten auf den verschiedensten Gebieten auf, einige Beispiele seien nachstehend angegeben.

Von großer praktischer Bedeutung ist vor allem die Möglichkeit, in Glasblöcken, welche zu optischen Instrumenten verarbeitet werden sollen, die vorhandenen Schlieren zu erkennen; das Glasstück wird hierzu mit zwei parallelen Schliffflächen versehen und dann an den Ort x y in Figur 1 gebracht. Fertige Linsen lassen sich auf ihre Güte (Schlierenfreiheit, Schliffehler direkt prüfen (A. Toepler 1864).

Verwachsungen, Zwillingsbildungen und dergleichen in Kristallen lassen sich mit der Schlierenmethode oft schärfer als mit anderen Beobachtungsmethoden erkennen (A. Kundt 1883).

Kleinste Konzentrationsunterschiede in Lösungen, deren Nachweis z. B. an Elektroden galvanischer Elemente von Interesse sein kann (W. Hittorf 1901) lassen sich leicht erkennen.

Die Grenze farbloser Gase, z. B. von Aetherdampf über einer mit Aether gefüllten Schale ist mit größter Leichtigkeit mit der Schlierenmethode zu sehen und der Untersuchung zugänglich gemacht; man kann z. B. die Gasfäden aus Röhren ausströmenden Leuchtgases an Stelle der sogenannten empfindlichen Flammen zum äußerst empfindlichen Nachweise unhörbar hoher Töne, ja zu indirekter Sichtbarmachung der Wellenbewegung bei diesen benutzen (A. Toepler 1864).

Die erwärmte Lufthülle, welche Flammen aber auch schon mäßig erwärmte Gegenstände, z. B. eine Hand, umgibt, und die von solchen aufsteigende warme Luft ist mit der Schlierenmethode zu erblicken, überhaupt sind in festen flüssigen oder gasförmigen Körpern bei scharfer Begrenzung schon Gebiete sehr geringer Temperaturdifferenz gegen ihre Umgebung zu sehen, und damit ist die Untersuchung mancher Vorgänge, z. B. der singenden Flammen (A. Toepler 1864), ermöglicht, wo andere Hilfsmittel versagen oder störend eingreifen.

Weit über den engeren Kreis der Physiker hinaus wurde die Schlierenmethode dadurch bekannt, daß A. Toepler 1864 zeigte, daß mit ihrer Hilfe hinreichend starke Schallwellen direkt sichtbar zu machen seien. A. Toepler hat mit seiner Schlierenmethode überhaupt als erster den Schall gesehen. Man erzeugt, vgl. Figur 1, am Orte x y einen kurzen elektrischen Entladungsfunken einer nicht zu kleinen Leidener Flasche; diese schallgebende Funkenstrecke liege hierbei in der Blickrichtung, d. h. in der Richtung ba, so daß die Funkenelektroden das Licht des Funkens, dessen Schall- — besser Knallwelle — sichtbar werden soll, abblenden. An der Stelle des Lichtpunktes a werde ein zweiter, der Beleuchtungsfunke, erzeugt. Schwierig ist allein zwischen dem Auftreten des Schallfunkens und des Beleuchtungsfunkens die kleine Zeitdifferenz herzustellen, welche verstreichen muß, damit die Schallwelle des ersteren bis zu einer gewünschten Größe sich ausgedehnt hat. Die Einzelheiten der Anordnung sind in der Originalarbeit nachzulesen. Veränderungen und Ergänzungen sind von E. Mach, R. Wood,

M. Toepler und anderen vorgeschlagen worden. In Figur 5 ist die Photographie einer solchen Schallwelle (von M. Toepler

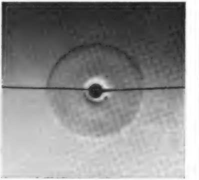


Fig. 5.

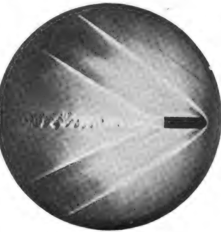


Fig. 6.

1908) wiedergegeben. — Natürlich kann man auch leicht sehen oder photographieren, wie eine solche Welle reflektiert oder gebrochen wird, wie an Gittern nach dem Huyghensschen Prinzipe Elementarwellen neu entstehen, die sich dann weiterhin wieder zu einer einzigen Welle zusammenschließen usw.

Von Bedeutung ist weiter die Möglichkeit, die Vorgänge in der Luft um ein fliegendes Geschoß herum mittels der Schlierenmethode sehen und photographieren zu können (E. Mach 1887). Hierzu ist nur nötig, daß das Geschoß im Augenblicke, wo es den Raum xy passiert, einen Beleuchtungsfunken in a auslöst. In Figur 6 ist eine solche Photographie wiedergegeben (von W. Schwinning 1903 aufgenommen). Man sieht die direkt nicht sichtbaren Druckwellen, Verdünnungswellen, Luftwirbel, welche in der Umgebung des fliegenden Geschosses auftreten. Mit ihrer Ausbildung hängt der Energieverlust beim Fluge zusammen; eingehende Untersuchungen derselben für verschiedene Geschoßformen hat zur Auffindung von Verbesserung dieser geführt.

Strömt Luft oder ein Gas unter hohem Ueberdrucke aus einer engen Oeffnung aus, so ist der entstehende Gasstrahl mittels der Schlierenmethode weithin zu sehen. In ihm treten eigentümliche Regelmäßigkeiten auf, stehende Wellen, welche zu interessanten Untersuchungen Anlaß gegeben haben (E. Mach und P. Salcher 1889, L. Mach 1897, R. Emden 1899); vgl. auch den Artikel „Gasbewegung".

Daß schließlich das Hervortreten vieler sonst unsichtbarer Einzelheiten an mikroskopischen Objekten bei Anwendung der Schlierenmethode am Mikroskope in verschiedenster Weise von Nutzen sein kann, braucht kaum hervorgehoben zu werden.

Literatur. *Die Arbeiten von* ***A. Toepler*** *über seine Schlierenmethode und ihre Anwendungen sind in Ostwalds Klassikern Heft 157 u. 158 zusammengefaßt.*

M. Toepler.

Schlotten.

Mit diesem Ausdruck bezeichnet der Geologe die im Gips durch Auflösung entstandenen Hohlräume und Höhlen (vgl. den Artikel „Verwitterung").

Schmitt
Rudolf.

Geboren am 5. August 1830 im Pfarrhaus des kurhessischen Dorfes Wippershain, blieb seiner Heimat lange Zeit treu, widmete sich an der Landesuniversität Marburg naturwissenschaftlichen, besonders chemischen Studien unter Hermann Kolbes Leitung, zu dessen bedeutendsten Schülern er zählt. Nach langer Assistentenzeit habilitierte er sich in Marburg, wurde 1865 an die Gewerbeschule in Kassel, 1869 an die Industrieschule zu Nürnberg, 1870 an die Polytechnische Schule zu Dresden (seit 1890 Tech-

nische Hochschule) berufen, wo er bis zum Jahre 1893 mit großem Erfolge wirkte.

Der Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Tätigkeit lag in der Ausbildung junger Chemiker durch den Laboratoriumsunterricht, dem er durch seine kraftvolle Persönlichkeit ein besonderes Gepräge gab. Seine früheren Arbeiten tragen den Stempel des Geistes und der Mitarbeit seines Lehrers, so die damals bedeutsame Ueberführung der Kohlensäure in Ameisensäure, der Aepfel- und Weinsäure in Bernsteinsäure, ferner die Untersuchung von Amidobenzolsulfonsäure sowie von Abkömmlingen der Salicylsäure. Die späteren Experimentalarbeiten betreffen meist die Chemie von Benzolderivaten und haben zur Kenntnis wichtiger Verbindungsreihen wesentlich beigetragen, z. B. die über Nitro-, Amido-, Diazo-Phenole, organische Fluorverbindungen, Chinonderivate und andere. Von größtem Einfluß auf seine und anderer Forschungen war die Untersuchung über die Bildung der Salicylsäure aus Phenol und Kohlensäure, sowie analoger Verbindungen. Auch technisch ist die dabei gewonnene Erkenntnis solcher Vorgänge für die Entwickelung einzelner Zweige der chemischen Industrie bedeutsam geworden.

Seine Abhandlungen sind in Liebigs Annalen, seit 1870 im Journal für praktische Chemie veröffentlicht (vgl. die Nekrologe von W. Hempel in den Berichten der deutschen Chemischen Gesellschaft **31**, 3359, und von E. von Meyer im Journal für praktische Chemie **57**, 397). Schmitt starb am 18. Februar 1898 in Radebeul bei Dresden, wo er im Ruhestande, meist von schweren Leiden geplagt, noch 4 Jahre lang gelebt hat.

E. von Meyer.

Schmitz
Friedrich.

Geboren am 8. März 1850 in Saarbrücken. Er studierte von 1867 bis 1870 in Bonn und darauf in Würzburg Naturwissenschaften. Nachdem er am Kriege 1870/71 teilgenommen hatte, promovierte er 1871 in Bonn. Im folgenden Jahre ging er nach Halle als Assistent de Barys, dem er auch nach Straßburg folgte. 1874 kehrte er nach Halle zurück, um sich dort zu habilitieren. Nachdem er 1878 in Neapel an der zoologischen Station tätig gewesen war, folgte er im selben Jahre einem Rufe als Extraordinarius nach Bonn und 1884 einem solchen als ordentlicher Professor nach Greifswald, wo er am 24. Januar 1895 starb. Seine Arbeiten bezogen sich zunächst auf die Entwickelungsgeschichte von Phanerogamen, wobei er der Deszendenzlehre ablehnend gegenübertrat. Von besonderer Bedeutung sind seine späteren Arbeiten über Meeresalgen, besonders Florideen geworden, deren Fruchtbildung und Systematik er in zahlreichen Abhandlungen studierte.

Literatur. *P. Falkenberg, in den Berichten der Deutschen Botanischen Gesellschaft, Bd.* 10 *(1895), S. (47) bis (53); dort auch ein Schriftenverzeichnis.*

W. Ruhland.

Schmucksteine.

A. Allgemeines über Schmucksteine.

1. Einleitung. Edelsteine und Halbedelsteine. 2. Die Namen der Edelsteine. 3. Erkennung und Unterscheidung der Edelsteine. 4. Verwendung und Bearbeitung. 5. Schlifformen. 6. Schleifprozeß. 7. Andere Arten der Bearbeitung. 8. Fassen und Aufbringen. 9. Fehler der Edelsteine. 10. Wert und Preis. 11. Verfälschungen. 12. Synthetische Edelsteine. 13. Mit Edelsteinen verbundener Aberglaube.

1. Einleitung. Edelsteine und Halbedelsteine. Die Edelsteine bilden nicht eine bestimmte, scharf umgrenzte Gruppe des Mineralreichs. Man versteht darunter diejenigen Mineralien, die sich wegen ihres schönen Aussehens zum Schmuck des menschlichen Körpers und zur Verzierung von allerlei Gerätschaften eignen. Die Schönheit beruht auf dem hohen Glanz (Feuer), der vollkommenen Farblosigkeit oder auch der schönen Färbung, zuweilen auf einem auffallenden Farbenspiel und meist auf der klaren Durchsichtigkeit. Nur wenige der besseren Edelsteine sind trübe (Türkis), häufiger ist dies bei geringeren Sorten (Chalzedon, Lasurstein, Malachit).

Die Schönheit des Aussehens genügt aber für sich allein noch nicht. Damit diese dauernd erhalten bleibt, muß eine möglichst große Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen hinzutreten. Am wichtigsten ist in dieser Hinsicht die Härte, die eine Beschädigung bei der Benutzung des Steins hindert. Es gibt hier nichts Gefährlicheres als den Staub, der auch bei der sorgfältigsten Aufbewahrung alles mehr oder weniger reichlich bedeckt. Staub besteht in der Hauptsache aus feinsten Quarzteilchen. Gute Edelsteine müssen also härter sein als Quarz, nur dann leiden sie nicht beim Abwischen des Staubes, während weichere Steine auch bei der größten Vorsicht durch den Gebrauch allmählich zerkratzt und mehr oder weniger rasch unansehnlich werden. Solche Härte, größer als die des Quarzes, wird daher auch Edelsteinhärte genannt.

Die für einen Edelstein erforderlichen Eigenschaften, schönes Aussehen in Verbindung mit großer Härte, sind nicht bei allzu vielen Mineralspecies in vollkommener Weise vereinigt. Auch bei diesen zeigen nicht alle Exemplare dieselbe vorteilhafte Beschaffenheit. Wenn schon alle zu einer Spezies gehörigen Stücke dieselbe Härte haben, so pflegen doch die meisten von ihnen recht unansehnlich und daher als Edelsteine unbrauchbar zu sein. Meist sind nur wenige schön genug zum Schmuck. Man unterscheidet danach gemeine und edle Varietäten der betreffenden Mineralspecies, und nur von den edlen Varietäten und von ihrer Bedeutung als Schmucksteine ist

im folgenden die Rede, die Kenntnis ihrer mineralogischen Eigenschaften wird dabei vorausgesetzt. Die Seltenheit ist gemeiniglich um so größer, je ausgeprägter die ausgezeichneten Edelsteineigenschaften in demselben Stück miteinander vereinigt sind. Daraus folgt bei der regen Nachfrage nach solchen Dingen der hohe Preis und die große Kostbarkeit ohne weiteres; die feinsten Edelsteine sind mit die kostbarsten und wertvollsten Gegenstände auf dieser Erde, die man daher nur im Schmuck der Reichen findet.

Nicht alle zum Schmuck benützten Mineralien entsprechen aber in gleicher Weise den erwähnten Bedingungen. Die Schönheit des Aussehens ist bei manchen geringer und namentlich gilt dies für die Härte. Derartige Steine sind weit verbreiteter und daher weniger kostbar; sie finden sich dann auch in den Zieraten der Aermeren. Wir haben also Schmucksteine von größerer und geringerer Vollkommenheit. Darauf beruht eine Einteilung, die freilich nicht besonders scharf ist. Diejenigen Schmucksteine, bei denen das schönste Aussehen mit der größten Härte verbunden ist, werden als eigentliche Edelsteine (Juwelen) bezeichnet. Von manchen werden nur Diamant, Rubin und Saphir, sowie Smaragd hierher gerechnet, von anderen wird der Kreis mehr oder weniger erweitert. Alle übrigen, die weniger seltenen und wertvollen Edelsteine geringeren Ranges, besonders die Quarzvarietäten, werden als Halbedelsteine von diesen unterschieden.

2. Namen der Schmucksteine. Die Benennung der Edelsteine und Halbedelsteine durch die Juweliere weicht zum Teil von der der betreffenden Mineralien durch die Mineralogen ab, da beide dabei von verschiedenen Gesichtspunkten ausgehen. Die Mineralogen fassen alle Stücke, die in ihren wesentlichen Eigenschaften übereinstimmen, zusammen zu einer Species und benennen sie mit einem Namen, z. B. Quarz, Korund, Beryll usw. Besonders wichtig sind hierbei die chemische Zusammensetzung und die Kristallform, während anderes, z. B. die Farbe, als eine vielfach zufällige Erscheinung, von untergeordneter Bedeutung ist. Umgekehrt legt der Juwelier auf jene beiden Eigenschaften nicht den geringsten Wert, während bei ihm meist gerade die Farbe hervorragend wichtig und daher für die Bezeichnung maßgebend ist. So gibt es für ihn nicht den Begriff Korund. Er nennt den roten Edelkorund Rubin und unterscheidet ihn scharf von dem blauen, dem er den Namen Saphir gibt, sowie von den übrigen, noch anders gefärbten Varietäten dieses Minerals. Ebenso ist es mit der Species Beryll, innerhalb der der Juwelier nur den kostbaren, prächtig grünen Smaragd, den blaßgrünlichblauen Aquamarin und den gelben Goldberyll kennt und nach der Farbe unterscheidet. Andererseits macht der Juwelier keinen großen Unterschied zwischen dem gelben Topas und dem gleichgefärbten Quarz, dem Citrin der Mineralogen; er faßt beide der gleichen Farbe wegen zusammen und nennt den letzteren ebenfalls Topas, vielleicht speziell Goldtopas usw.; da beide sich im Aussehen nicht wesentlich unterscheiden und ebenso auch nicht im Preis, so fällt für ihn der Grund für eine Trennung weg. Er nennt aber auch den gelben Edelkorund Topas, unterscheidet ihn jedoch, seiner hervorragenden Eigenschaften, besonders seiner viel größeren Härte und seines höheren Werts wegen, als „orientalischen Topas“. Ebenso nennt er die anderen Farbvarietäten des Edelkorunds „orientalisch“ und setzt dieses Beiwort zu dem Namen eines in der Farbe ähnlichen anderen Edelsteins: orientalischer Smaragd, Amethyst, Hyacinth usw. Dies rührt daher, daß man früher der Meinung war, alle besseren Edelsteine stammen aus dem Orient. In diesem Sinne sprach man auch von „orientalischem Opal“ usw. Jetzt weiß man, daß die Edelsteine nicht an bestimmte Teile der Erde gebunden sind; die ursprüngliche Fundortsbezeichnung ist nun zu einer Qualitätsbezeichnung geworden. Ganz entsprechend bezeichnet das Beiwort „okzidentalisch“ vielfach etwas Geringeres.

Während hier bessere Edelsteine mit dem Namen von schlechteren bezeichnet werden, geschieht ebenso häufig das Umgekehrte. Schlechtere Steine werden nach besseren, ebenfalls mit unterscheidenden Zusätzen, benannt, vielleicht zum Teil betrügerischerweise. Kaprubin ist roter Granat, der den Diamant vom Kap begleitet, Rubinspinell der schön rote Spinell, marmaroscher, böhmische, irische, schaumburger usw. Diamanten sind Bergkristalle usw.

Manchmal ist kein rechter Grund für die Verschiedenheit der Benennung zu erkennen. So heißt der Demantoid bei den Juwelieren stets Olivin, während sie diesen als Chrysolith oder Peridot bezeichnen. Unter Chrysolith wird aber auch der Chrysoberyll (Cymophan) verstanden.

Die farbigen Edelsteine werden im Gegensatz zu den farblosen, besonders zum Diamant Farbsteine (couleurte Steine) genannt. Bis zu einem gewissen Grade deckt sich dies mit dem Begriffe der Phantasiesteine (fancy stones). Man versteht darunter aber gewöhnlich mehr die billigen Farbsteine, wohl nie Rubin, Saphir und Smaragd, dagegen seltenere Farbenvarietäten auch kostbarer Arten, wie z. B. die übrigen obenerwähnten Abarten des edlen Korunds und die schön gefärbten Diamanten.

3. Erkennung und Unterscheidung der Edelsteine. Die Erkennung der Edelsteine und ihre Unterscheidung voneinander gelingt erfahrenen Juwelieren meist durch das bloße Ansehen, aber auch bei ihnen sind Irrtümer möglich. Sicherheit geben nur die bekannten mineralogischen Methoden, die auf der Bestimmung des spezifischen Gewichts, der Härte, der einfachen und der doppelten Lichtbrechung, des Brechungskoeffizienten, des Pleochroismus (vgl. den Artikel „Farbe“) usw., bei rohen Steinen der Blätterbrüche und manchmal auch der Kristallform beruhen. Geschliffene Steine müssen dabei in vielen Fällen aus der Fassung herausgenommen werden. Es gilt die Regel, wertvolle Steine nur ungefaßt zu kaufen, weil sie nur so allseitig untersucht und auch auf Fehler geprüft werden können.

4. Verwendung und Bearbeitung. Zum Schmuck benützt man die Edelsteine selten in ihrem natürlichen, rohen Zustande. Meist werden sie zur Erhöhung der Schönheit und um sie zu gewissen besonderen Zwecken geeignet zu machen, in verschiedener Weise bearbeitet. Am wichtigsten dabei ist das Schleifen. Dabei werden die rohen Steine („Brut“ der Edelsteinschleifer) vielfach unter Verlust der Hälfte des Gewichts und oft mehr, mit einer neuen rundlichen oder aus kleinen Flächen, Facetten, zusammengesetzten Oberfläche versehen. Bei pleochroitischen Mineralien muß der Schliff so eingerichtet werden, daß sich der Stein in der bestmöglichen Farbe zeigt. Die langjährige Erfahrung hat einige Schliffformen kennen gelehrt, die für die verschiedenen Steine je nach ihrer besonderen Beschaffenheit sich am vorteilhaftesten erwiesen haben. Farblose und licht gefärbte Steine werden anders geschliffen als dunkelfarbige, durchsichtige anders als undurchsichtige usw. Auch die Verwendungsart des geschliffenen Steins ist dabei zu berücksichtigen. Dabei streben die europäischen Steinschleifer danach dem Stein die höchste mögliche Schönheit zu verschaffen und nehmen dabei den erwähnten starken Verlust in Kauf, während ihre orientalischen Kollegen es oft vorziehen, den Stein möglichst groß zu erhalten, wenn auch die Schönheit dabei nicht sehr entwickelt wird. Daher werden solche orientalisch (indisch) geschliffenen Steine, sogenannte „Labora“, meist in Europa noch einmal umgeschliffen. Uebrigens werden die Edelsteine nicht nur zum Schmuck des menschlichen Körpers verwendet, sondern es werden aus ihnen, besonders aus den häufiger und in größeren Stücken vorkommenden sogenannten Halbedelsteinen, auch kleinere Gebrauchsgegenstände und Objekte des Kunstgewerbes (Schalen, Vasen, Urnen, Dosen, Stock- und Schirmknöpfe in Form von Kugeln usw., Petschafte, Briefbeschwerer, Tintenzeuge und Federhalter usw. hergestellt, wobei das Mineral oft nur einen dünnen Ueberzug über Metall bildet (furnieren). Außerdem dienen sie wegen der großen Härte vielfach in der Technik zu Bohrkronen (Diamant), Uhrsteinen (sogenannten „rubis“), Reibschalen (Achat), Trägern der Achsen feiner Wagen und der Kompaßnadeln usw., endlich, was besonders wichtig ist, zu Schleifpulver.

5. Schliffformen. Eine der wichtigsten dieser Schliffformen, namentlich für farblose und licht gefärbte Steine, besonders Diamant, ist die Brillantform. Sie kann bezeichnet werden als ein reguläres Oktaeder, an dem zwei gegenüberliegende Ecken meist in den in Figur 1 angegebenen

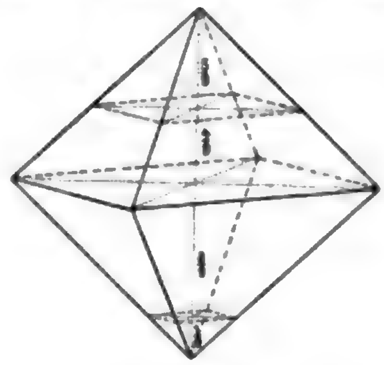


Fig. 1.

Verhältnissen verschieden stark abgestumpft sind; bei tiefer gefärbten Steinen ist die Abstumpfung etwas stärker, wodurch der Stein entsprechend dünner und durchsichtiger wird. Außerdem ist noch eine Anzahl kleinerer Facetten in der aus Figur 2

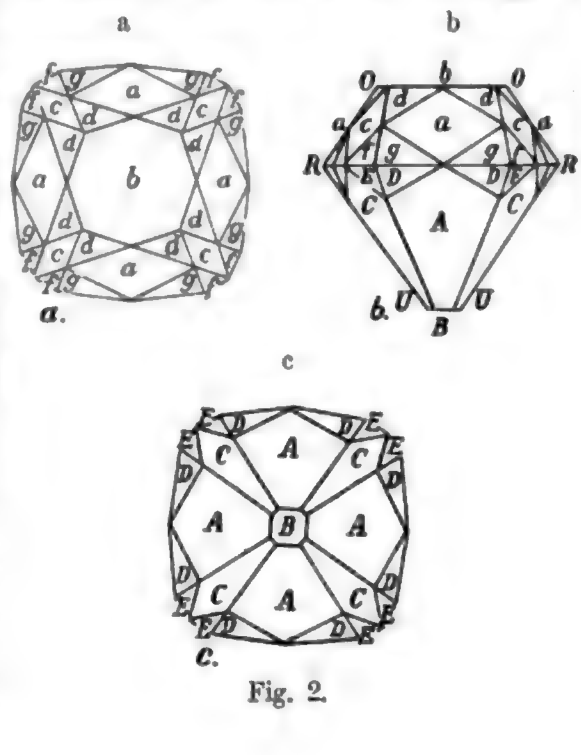


Fig. 2.

ersichtlichen Weise angebracht. Das Stück OORR (Fig. 2b) heißt der Oberteil (Oberkörper, Pavillon, Krone); er ist in Figur 2a von oben dargestellt und wird bei der gewöhnlichen Fassung dem Beschauer zugekehrt. RRUU (Fig. 2b, oder von unten gesehen Fig. 2c) ist der Unterteil (Unterkörper, Külasse). RR in Figur 2b, entsprechend der äußeren Umrandung in Figur 2a und c heißt die Rundiste (Rand, Einfassung, Gürtel). Hier stoßen Ober- und Unterteil in einer ebenen Fläche zusammen und hier wird der Stein beim Fassen befestigt. Die breite Fläche b des Oberteils, die dem Beschauer zugekehrt ist (Fig. 2, a und b) ist die Tafel, die gegenüberliegende kleine Fläche des Unterteils B (Fig. 2, b und c) die Kalette; beide sind der Rundiste parallel. Diese Namen werden in derselben Weise auch bei anderen Schlifformen angewendet. An einem normalen Brillant (Fig. 2) sind oben außer der Tafel 32, unten außer der Kalette 24 Facetten. Manchmal, besonders bei großen Steinen, werden in derselben symmetrischen Gruppierung noch einige weitere kleine Facetten angebracht. Am Oberteil liegen die Facetten in drei Reihen übereinander (dreifacher Brillant, Fig. 2). Dies ist die moderne Form; früher machte man weniger Facetten, die am Oberteil nur in zwei Reihen angeordnet waren (zweifacher Brillant). Der Umriß der Rundiste ist verschieden und namentlich in der Neuzeit meist mehr rundlich, als in Figur 2, so daß die Facetten a und c oben, bezw. A und C unten nahezu einander gleich werden. Manchmal ist die Form mehr oblong oder dreieckig oder auch wohl an einer Ecke etwas verlängert (birnförmig, Pendeloque-Brillant), oder spitzoval, an zwei gegenüberliegenden Ecken spitz zulaufend (Navette- oder Marquis-Form), oder herzförmig usw., je nach der Gestalt des Rohsteins oder der beabsichtigten Verwendung. Ein Ersatz für die Brillantform und von ähnlicher Wirkung ist der Sternschnitt von Caire, der amerikanische Brillantschliff und der Jubiläumsschliff.

Für intensiv gefärbte Steine ist der Treppenschnitt und seine Nebenformen besonders geeignet. Seine Form ist aus Figur 3 ersichtlich (b von oben, a von unten). Auch hier kann die Rundiste verschieden gestaltet sein und die Treppen sind je nach der Tiefe der Färbung bald steiler, bald flacher, ihre Zahl ist bald größer, bald kleiner. Manchmal werden am Oberteil andere Facetten, ähnlich wie beim Brillant usw. angebracht; es entstehen dann Nebenformen, die als gemischter Schnitt, Schliff mit verlängerten Brillantfacetten und mit doppelten Facetten und als Maltheserkreuz bezeichnet werden. Tafelsteine sind Oktaeder, an denen nur zwei gegenüberliegende Ecken ziemlich gleich stark abgestumpft sind; wenn nur wenig, hat man den Dickstein, wenn sehr stark, den Dünnstein. An diese schließen sich die dünnen runden, ovalen, schildförmigen und anders gestalteten Steine der Siegelringe usw. an, bei denen die ausgedehnte Tafel von nur einer Reihe schmaler Facetten umgeben ist (Biseauschliff).

a b

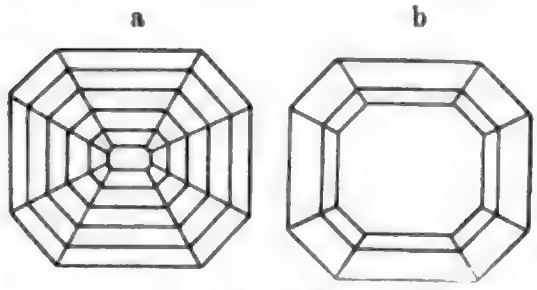


Fig. 3.

Nur einen Oberteil haben die Rosetten (Rosen) (Fig. 4, a von der Seite, b von oben).

a b

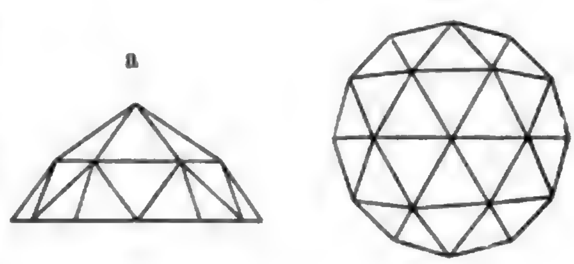


Fig. 4.

Die 24 in mehreren Reihen übereinanderliegenden Facetten bilden eine niedere Pyramide. Es ist die passendste Form für dünne Steine, die beim Brillantschliff gar zu viel Materialverlust erleiden würden. Im einzelnen kann die Zahl und die Anordnung der Facetten auch etwas anders werden, wie z. B. bei der „rose recoupée“, auch kann die Form der Rundiste wie beim Brillant etwas wechseln. Manchmal werden Oberteile von Brillanten hergestellt, denen der Unterteil fehlt und die nach hinten von der Rundiste begrenzt sind, sogenannte Halbdiamanten.

Pendeloques kann man sich vorstellen als zwei mit ihren Grundflächen aneinandergewachsene, nach einer Seite spitz zulaufende Rosetten oder auch als zwei sich in derselben Weise verhaltende Halbbrillanten mit, wenigstens auf einer Seite, breiter Tafel. Sie haben eine ausgesprochene Rundiste; fehlt diese, so daß die Facetten ohne Unterbrechung ringsherum laufen, und der Stein eine mehr drehrunde Form annimmt, dann hat man die Briolette. Sie sowohl als die Pendeloques werden an

ihrem spitzen Ende gefaßt und aufgehängt und u. a. zu Ohrgehängen verwendet.

Eine Form mit einer mehr oder weniger hohen schildförmigen gerundeten Wölbung, entweder nur nach einer Seite oder auch nach der entgegengesetzten, heißt muglig oder en cabochon. Der Rand ist bald kreisrund, bald oval oder nach einer Richtung in eine Spitze ausgezogen (pendeloque en cabochon) oder spitzoval (Navetteform) usw. Längs des Randes sind zuweilen kleine Facetten in einer Reihe oder in zweien angeschliffen. Das sind die Hauptformen für trübe Edelsteine, doch finden sie sich auch bei stark gefärbten durchsichtigen. Diese werden dann zur Erhöhung der Durchsichtigkeit zuweilen von der ebenen Grundfläche aus rundlich ausgehöhlt, ausgeschlegelt. Steine dieser Art heißen Schalen, z. B. Granatschalen usw.

Unregelmäßige rundliche Steine, an denen oft nur die Unregelmäßigkeit der Rohform geglättet und die Oberfläche poliert ist, heißen Baroques.

Es gibt noch mancherlei besondere Formen, die mit besonderen Namen belegt worden sind. Vielfach findet man solche, die aus Teilen der oben genannten Formen zusammengesetzt sind, sogenannte Bastardformen. Häufig werden von den Steinschleifern nach ihren eigenen Ideen den speziellen Verhältnissen angepaßte Formen hergestellt, Phantasieformen. Steine mit ganz unregelmäßig angeordneten Facetten werden Kappgut genannt. Steine, die beim Schleifen fehlerhafterweise zu dick ausgefallen und die daher nicht genügend durchsichtig sind, werden klumpig, zu dünne gestreckt genannt.

6. Schleifprozeß. Das Rohstück wird entweder so genommen, wie es die Natur bietet, oder es wird durch Zersägen, Spalten oder einfach durch Hammerschläge der beabsichtigten Schlifform möglichst entsprechend hergerichtet, wobei man, wie übrigens auch beim Schleifen, fehlerhafte Stellen möglichst zu entfernen sucht. Das Stück wird dann mittels eines geeigneten Kitts am einen Ende eines hölzernen oder metallenen Stifts von passender Länge und Dicke, dem Kittstock, befestigt und mit dessen Hilfe auf die obere ebene Fläche einer rasch um eine vertikale Achse rotierenden Scheibe, die Schleifscheibe, gedrückt. Diese besteht je nach der Härte des Steins, aus Stahl, Gußeisen, Bronze usw. und wird am Rand, wo der zu schleifende Stein angreift, mit einem harten, mit Wasser oder Oel angerührten Pulver bestrichen. Dieses Schleifpulver ist bei den härtesten Edelsteinen Diamantpulver, bei anderen verwendet man Korund oder Schmirgel, oder die Kunstprodukte Karborundum, sowie Korubin, die bei dem Thermitverfahren erhaltene korundreiche Schlacke. Es entsteht dadurch allmählich eine Facette. Indem man dem Kittstock dann eine andere Neigung gibt, erhält man eine zweite usf. Ist so eine Seite des Steins fertig geschliffen, wird er aus dem Kitt herausgenommen, in umgekehrter Lage wieder eingesetzt und es wird in derselben Weise wie vorher auch auf der entgegengesetzten Seite weiter verfahren, bis der Stein ringsum mit Facetten versehen ist. Dabei wird der Kittstock entweder in der Hand gehalten, oder er wird, wenn bei feinen Steinen die Form besonders exakt und regelmäßig gemacht werden soll, in eine Zange eingespannt, in der er mittels eines Gradbogens, des Quadranten, jedesmal genau die für die betreffende Facette richtige Neigung erhält und durch Gewichte oder mit der Hand auf die Schleifscheibe gedrückt werden kann. Vielfach werden die Facetten vorbereitet, indem man zuerst den Kittstock in der Hand festhält und sie ihrer ungefähren Lage nach im Rohen anlegt. Diese vorläufige Operation heißt das Rundieren; das Schleifen gibt dann den Facetten ihre endgültige, richtige Lage und Größe. Jetzt sind aber die Steine noch über die ganze Oberfläche hin matt und rauh, die Facetten werden dann durch das Polieren glatt und glänzend gemacht. Dabei wird für jede einzelne Facette der Schleifprozeß wiederholt, nur auf einer weicheren Scheibe von Kupfer, Blei usw. und mit einem weicheren Pulver, das nun als Poliermittel bezeichnet wird: Zinnasche, Englischrot, Tripel usw. und damit ist die Operation dann beendet. Dies ist die eigentliche Edelsteinschleiferei, wie sie in Deutschland besonders in Idar bei Oberstein a. Nahe und in Waldkirch im Schwarzwald, außerdem noch an einigen Orten im französischen Jura und bei Katharinenburg im Ural im großen betrieben wird. Beim Diamant wird das Verfahren etwas modifiziert. Für die Mineralien der Quarzgruppe wird besonders in der Gegend von Idar und Oberstein ganz anders vorgegangen, wie wir unten sehen werden.

7. Andere Arten der Bearbeitung. Manche Mineralien können auf der Drehbank geformt werden (Bernstein). Durch Durchbohren werden Steine zum Aufreihen auf Schnüren, sogenannte Perlen, oval oder rundlich, mit oder ohne Facetten, hergestellt. Gravieren (oder Schneiden) liefert die Gemmen, entweder vertieft (Skulptur) zur Herstellung von Intaglien (Figuren, Wappen, Buchstaben), z. B. auf Steinen für Siegelringe, oder erhaben (Tornatur) zur Anfertigung von Kameen, besonders aus Steinen mit verschiedenfarbigen Schichten (Onyx). Statt der zeitraubenden und kostspieligen Arbeit mit dem

Grabstichel werden kleine rasch laufende Rädchen mit Diamantpulver (sogenannte Zeiger) benutzt, oder vielfach auch Aetzmittel, bei Kieselsäuremineralien Flußsäure usw., allein oder zur Unterstützung des eigentlichen Gravierens.

Bei der Verarbeitung der Mineralien zu Schmuck wird nicht selten eine Färbung oder eine Veränderung der Farbe vorgenommen. Poröse Mineralien imprägnieren sich mit Farbstoffen (z. B. Achat, s. unten), farblose, z. B. Bergkristall, in glühendem Zustand in farbige Flüssigkeiten geworfen, erhalten oberflächlich zahlreiche Sprünge, in welche jene eindringen und den Stein, allerdings nicht gleichmäßig, färben, sogenannte „craquelés". Durch Erhitzen (Brennen) wird der gelbe brasilianische Topas rosenrot, Amethyst und Rauchtopas gelb, gelber und brauner Karneol schön rot usw. (gebrannter Topas, Amethyst, Rauchtopas, Karneol usw.). Ob Farbenänderungen durch Radium- und andere Strahlen praktisch verwendbar sind, ist zweifelhaft. Uebrigens ändern manche Steine ihre Farbe von selber am Licht oder an der Luft, manche Topase blassen ab, mancher blaue Türkis wird grün usw., was dann sehr nachteilig ist.

8. Fassen. Aufbringen. Die geschliffenen Steine werden in Schmuckstücke eingefügt, gefaßt. Dies geschieht entweder à jour, so daß der Stein ohne undurchsichtigen Hintergrund nur am Rand (der Rundiste) von kleinen metallenen (Gold, Silber, Platin usw.) Klammern oder Zängchen (Krappen) festgehalten wird. Man kann dann durch den gefaßten Stein hindurchsehen. Diese Fassung wird am meisten bei fehlerlosen durchsichtigen Steinen mit Ober- und Unterteil (Brillanten usw.) gewählt. Andere Steine, namentlich solche ohne Unterteil (Rosetten usw.), sowie fehlerhafte, ferner die undurchsichtigen werden an der Seite und hinten von Metall umgeben, so daß sie nur von oben (vorn) sichtbar sind. Dies ist die Fassung in einem Kasten. Sie ist fester als die à jour und erlaubt am bequemsten eine Verbesserung des Aussehens der Steine durch gewisse Hilfsmittel, die man als Aufbringen bezeichnet. Am wichtigsten sind hier die Folien, dünne Plättchen von glänzendem Metall (Gold, Silber, Kupfer usw.), von farbigem Glas oder Gelatine usw., die man durchsichtigen Steinen unterlegt und die sie glänzender und lebhafter gefärbt erscheinen lassen oder die auch durch Komplementärwirkung ungünstige schwache Färbungen verdecken. Manchmal wird die Hinterwand des Kastens mit Farbe bestrichen, öfters nur stellenweise, um ungleichmäßige Färbung zu verdecken, oder es wird auch der Stein selber hinten gefärbt, oft fleckig, zur rohen Nachahmung des Farbenspiels des Diamant (sogenannte Iris, aus farblosem Glas oder Quarz). Die Färbung im Hintergrund des Kastens ist häufig schwarz, Fassung auf Moor. Bei der Fassung à jour können ähnliche, aber schwächere Wirkungen durch entsprechende Behandlung des inneren, dem Stein zugekehrten Randes der metallenen Fassung erreicht werden. Fassungen besonderer Art sind im Gebrauch bei Pendeloques, die man für Ohrgehänge am spitzen Ende durchbohrt und so befestigt, für „Perlen", die man auf Schnüre reiht usw.

9. Fehler der Edelsteine. Jede Beeinträchtigung des schönen Aussehens eines Steins, trübe Stellen bei sonstiger Durchsichtigkeit, andersfarbige Flecke, Risse usw. bilden solche Fehler, die den Wert oft weit herabdrücken. Solche natürlichen Fehler können sehr mannigfaltig sein, immer ist es aber Aufgabe des Schleifers, sie bei seinen Operationen nach Möglichkeit zu entfernen oder doch zu verbergen. Er kann aber auch seinerseits Fehler hervorrufen, z. B. indem er den Steinen eine schlechte oder ungünstige Form gibt. Einige Fehler kehren häufig wieder und haben daher besondere Namen erhalten: Sand, kleine Körnchen fremder Mineralien; Staub, die Körnchen sind sehr fein, aber wenigstens stellenweise massenhaft angehäuft; Wolken, trübe, wolkenähnliche Stellen in durchsichtigen Steinen, die da, wo sie an die Oberfläche treten, keine feine Politur annehmen; Fahnen, weißliche, seidenartig schimmernde Streifen (daher auch Seide genannt), die auf der Anwesenheit von zahlreichen winzigen Poren oder Flüssigkeitseinschlüssen beruhen; Moos, kleine moosähnliche Einschlüsse; Federn, Risse nach Spaltungsflächen oder unregelmäßige; Eisige Flecken entstehen beim Schleifen, wenn die durch die Reibung bewirkte Erhitzung zu stark wurde: an solchen Stellen nimmt dann der Stein keine gute Politur mehr an. Die Fehler treten vielfach besonders deutlich hervor, wenn man den Stein in eine stark lichtbrechende Flüssigkeit legt. In ihrer Natur sind sie meist erst unter dem Mikroskop erkennbar. Ohne jede Spur von Fehlern ist kaum ein natürlicher Edelstein, geringe Fehler schaden aber dem Aussehen gemeiniglich nicht.

10. Wert und Preis. Sie sind, wie bei allen Waren, in der Hauptsache von Angebot und Nachfrage abhängig. Das Angebot wird im wesentlichen bestimmt durch das mehr oder weniger reichliche Vorkommen eines bestimmten Edelsteins, die Nachfrage durch die Mode und durch andere Umstände. Kriege, Handelskrisen usw. vermindern das Verlangen nach Edelsteinen,

allgemeiner wirtschaftlicher Aufschwung, Krönungsfestlichkeiten usw. vermehren es, besonders das nach den kostbareren. Bei jedem einzelnen Edelstein ist der Preis abhängig von der Schönheit und Reinheit, der Fehlerlosigkeit und von der Art und Güte des Schliffes, bei gleicher Qualität von der Größe. Diese wird nach dem Gewicht angegeben, dessen Einheit das Karat ist. Es wird gegenwärtig fast allgemein gleich 205 mg angenommen, früher schwankte es etwas von einem Ort zum anderen, etwa zwischen Florenz (197,200 mg) und Livorno (215,990 mg). In der Praxis wird das Karat in Vierundsechzigstel eingeteilt. Angestrebt wird eine Fixierung auf 200 mg (metrisches Karat) und die Einteilung nach dem Dezimalsystem. In einzelnen Ländern, z. B. in Deutschland, ist dies auch schon gesetzlich eingeführt.

Im allgemeinen steigt der Preis dem Gewicht der Steine entsprechend, vielfach aber auch in höherem Maße wegen der größeren Seltenheit schwererer Exemplare. Nach der sogenannten Regel von Tavernier sollte dies beim Diamant und anderen kostbaren Steinen im Quadrat des Gewichts stattfinden, so daß ein Stein von 2, 3 usw. Karat 4-, 9- usw. mal mehr wert wäre als ein solcher von 1 Karat. Aber diese Regel trifft wenigstens in der Jetztzeit nirgends zu. Der Schliff ist insofern von Einfluß, als manche Schliffformen komplizierter und daher teurer herzustellen sind, als andere. Daher ist z. B. ein Stein als Brillant mehr wert als ein ebensolcher als Rosette, bei sonst gleichen Verhältnissen. Vor allem ist aber ceteris paribus ein geschliffener Stein mehr wert als ein ungeschliffener, der ja beim Schleifen die Hälfte oder noch mehr seines Gewichts verliert, ganz abgesehen von den Kosten des Schleifens, die bei harten Steinen nicht gering sind.

Die einzelnen Edelsteinarten zeigen je nach der Qualität die allergrößten Unterschiede. Am höchsten im Wert stehen in besten Exemplaren zurzeit der Rubin und Smaragd und zum Teil auch der Saphir, dann erst folgt der Diamant, der somit bezüglich des Werts keineswegs, wie man häufig glaubt, an der Spitze steht.

11. Verfälschungen. Solche werden bei so kostbaren Sachen in großer Zahl und in der verschiedensten Weise hergestellt. Häufig sind sie ohne die genaueste Untersuchung auch für den Kenner schwer nachzuweisen, besonders bei gefaßten Steinen. Am häufigsten sind wohl die folgenden: 1. Weniger wertvolle Steine werden für wertvollere untergeschoben, Bergkristall, gebrannter Hyazinth, farbloser Korund usw. für Diamant, Granat für Rubin usw. Häufig ist dies leicht zu erkennen, oft aber ist es nur möglich durch Anwendung mineralogischer Instrumente und Methoden (vgl. S. 932). 2. Dubletten. Ein Ober- und ein Unterteil eines echten Steins sind mit Mastix aneinandergeklebt oder auch zusammengeschmolzen, so daß ein größerer, daher erheblich wertvollerer Stein vorgetäuscht wird (echte Dubletten); oder es ist nur der Oberteil echt, der Unterteil ist Bergkristall, Glas usw. (halbechte Dubletten, Mixte); oder beide Teile bestehen aus solchem unechten, farblosen Material, dazwischen liegt ein dünnes farbiges Glasplättchen oder eine Gelatinehaut von der Farbe des nachzuahmenden Steins (unechte Dubletten). In beiden letzteren Fällen hat die Dublette, von oben gesehen, das Aussehen des letzteren, von der Seite erkennt man den Betrug. 3. Glasflüsse (Glaspasten, Amausen) werden, farblos oder passend gefärbt, häufig zu solchen Nachahmungen verwendet. Die geringe Härte (H·= 5) und die einfache Lichtbrechung lassen das Glas meist leicht erkennen, wenn dies nicht schon durch bloßes Ansehen möglich ist. Besonders wichtig ist hier der Straß (Mainzer Fluß), ein Blei-, zuweilen ein Thalliumglas, beide ebenso stark lichtbrechend und farbenzerstreuend wie der Diamant und daher, gut geschliffen, dasselbe Farbenspiel zeigend. Ein Diamant und eine solche Glasimitation lassen sich kaum sicher durch das bloße Ansehen unterscheiden, wenn letztere frisch ist, durch den Gebrauch wird sie aber rasch unansehnlich wegen der geringen Härte (s. S. 930).

12. Synthetische Schmucksteine. Synthetische Edelsteine sind keine Verfälschungen, sondern Kunstprodukte, mit allen Eigenschaften der natürlichen Steine. Von ihnen wird in einem besonderen Artikel die Rede sein.

13. Mit Schmucksteinen verbundener Aberglaube. Aberglaube verschiedener Art knüpft sich an die Edelsteine. Manche gelten als glückbringend, so der Amethyst, der auch vor Trunkenheit bewahren soll (daher der Name), andere sind dem Träger unheilvoll, wie der Edelopal. Nephrit ist gut gegen Nieren-, Beryll gegen Augenleiden usw. Vielfach wurden im Altertum in die Edelsteine noch glückbringende Zeichen eingraviert (Abraxas- oder Zaubergemmen) und sie so als Amulett getragen. Dasselbe geschieht mit dem ein schwarzes Kreuz auf dem Querschnitt zeigenden Chiastolith (Kreuzstein). In alten Apotheken findet man noch jetzt Vorräte von Edelsteinen, die pulverisiert früher gegen allerlei Krankheiten eingenommen wurden. Auf abergläubischen Vorstellungen beruhen auch die Monats-, Apostel- und Namensteine. So gibt es auf diesem Gebiet noch manches andere, worauf aber hier nicht weiter eingegangen werden kann.

B. Die einzelnen Schmucksteine.

I. Diamant.

1. Allgemeines und Eigenschaften. 2. Diamantschleiferei. 3. Vorkommen und Fundorte.

1. Allgemeines und Eigenschaften. Der Diamant ist zwar nicht der kostbarste, aber der wichtigste aller Edelsteine; neun Zehntel der ganzen jährlich für Edelsteine ausgegebenen Summe entfallen auf ihn.

Von Bedeutung für seine Benutzung ist sowohl seine enorme Härte, als sein prächtiges Aussehen.

Die Härte kommt (abgesehen von der Verwendung in der Technik) in doppelter Hinsicht in Betracht: Einmal erlaubt sie einen besonders feinen Schliff mit vollkommen glatten und lebhaft glänzenden Facetten und mit ganz scharfen Kanten und Ecken, die auch beim längsten Gebrauch unverändert bleiben. Sodann dient das Diamantpulver, hergestellt aus unansehnlichen, zum Schmuck nicht verwendbaren Steinen, dem Bort, zum Schleifen des Diamants und anderer harter und feiner Edelsteine und zu anderen technischen Zwecken.

Das prächtige Aussehen beruht auf dem durch das Schleifen hervorgerufenen hohen Glanz, der klaren Durchsichtigkeit und der kräftigen Lichtbrechung und Farbenzerstreuung. Diese beiden letzteren Eigenschaften sind aus den folgenden Werten der Brechungskoeffizienten für rotes, grünes und violettes Licht zu ersehen:

$n_r = 2{,}40735$; $n_{gr} = 2{,}42694$; $n_v = 2{,}46476$, also Farbenzerstreuung: $n_v - n_r = 0{,}05741$.

Neben der großen Härte bedingen die hohen Brechungskoeffizienten den besonders kräftigen Glanz der geschliffenen Diamanten, der wegen der gleichzeitigen starken Farbenzerstreuung die charakteristische Beschaffenheit des Diamantglanzes annimmt. Der Glanz tritt auf allen Schliffformen in derselben Weise hervor, für das übrige Aussehen ist aber die Schliffform von wesentlicher Bedeutung. Geschliffen wird der Diamant kaum anders wie in der Form von Brillanten und Rosetten, und deren Nebenformen, alles übrige ist nicht der Rede wert. Diese zwei Formen sind so sehr die Hauptformen des Diamants, daß man unter „Brillant“ oder „Rosette“ schlechtweg Diamanten von dieser Gestalt zu verstehen pflegt. Nur ganz flache Steine oder Stücke von solchen werden zu Rosetten verarbeitet; wenn es die Form des Rohsteins irgend ohne gar zu großen Materialverlust erlaubt, wird ein Brillant daraus hergestellt. Diese Form soll vom Kardinal Mazarin erfunden worden sein. Sie erhält so genau wie möglich die oben (Fig. 1 u. 2) angegebenen Abmessungen, die sich als die günstigsten für den Diamant erwiesen haben. Nur bei ungünstig gestalteten Rohsteinen wird davon etwas abgewichen, was die Schönheit dann nicht unwesentlich zu beeinträchtigen pflegt, wie z. B. bei dem „Kohinur“ der englischen Krone. Der Vorteil des Brillantschliffs ergibt sich aus dem in Figur 5 dargestellten Schema. Ein aus der Luft einfallender Lichtstrahl z. B. *ab* wird nach *bc* gebrochen und in *c* an der dort liegenden Facette total reflektiert nach *cd*. Der Grenzwinkel zwischen Diamant und Luft ist wegen des großen Werts der Brechungskoeffizienten sehr klein und beträgt für mittlere, grüne Strahlen: 24° 20′; jeder auch noch so wenig stärker gegen das Einfallslot geneigte Strahl kann also bei *c* nicht in die Luft austreten, wie eine genauere Betrachtung unter Berück-

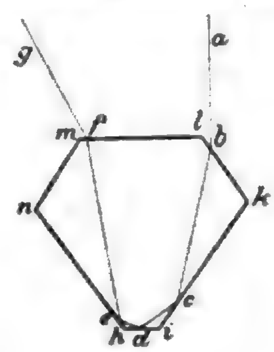


Fig. 5.

sichtigung der Winkelverhältnisse des Brillants leicht zeigt. Aus demselben Grund wird auch bei *d* und *e* Totalreflexion eintreten müssen, und erst der Strahl *ef* wird bei *f* so steil auf die Tafel *lm* auffallen, daß er nach *fg* in die Luft austreten kann. Einen ähnlichen Weg werden beinahe alle von vorn auf die Facetten *kl*, *lm*, *mn* usw. auffallenden Lichtstrahlen in dem Stein machen, z. B. wird ein einfallender Strahl *gf*, nachdem er den umgekehrten Weg *fedcb* in dem Stein durchlaufen hat, nach vorn in der Richtung *ba* aus diesem austreten müssen. Fast das ganze vorn einfallende Licht muß also wegen der vielfachen inneren Reflexionen im Unterteil auch wieder nach vorn austreten, es erhält zugleich einen eigentümlichen metallähnlichen Glanz und gelangt so in das Auge des Beschauers. Der Stein sieht daher schön leuchtend aus und erscheint wie mit glänzendem Licht erfüllt, während andere ebenso geschliffene Steine mit geringerer Lichtbrechung, z. B. Bergkristall, das meiste Licht nach hinten austreten lassen, da hier die Totalreflexion nicht mit derselben Macht wirkt. Solche Steine erscheinen daher kalt und tot. Jeder vorn in den Brillant eintretende Strahl des weißen Tageslichts wird dabei aber auch durch seine als Prismen wirkenden Facetten in seine farbigen Teilstrahlen zerlegt, die beim Diamant

wegen seiner starken Dispersion unter verhältnismäßig großen Winkeln auseinanderlaufen. Sie kommen daher getrennt ins Auge und gelangen so hier zur schönsten Wirkung. Auf diese Weise entsteht das prächtige funkelnde und flimmernde Farbenspiel des Diamants, das man auch manchmal als sein Feuer bezeichnet. Steine mit geringerer Farbenzerstreuung, z. B. Bergkristall, können diese herrliche Erscheinung nicht zeigen, auch wenn sie in derselben Form geschliffen sind, ebensowenig aber auch Diamanten in der Form der Rosetten. Deren breite Basis läßt fast alle vorn auffallenden Lichtstrahlen nach hinten austreten, so daß ein solcher Stein nur durch den auch bei ihm noch starken Glanz der Oberfläche wirken kann.

Das Farbenspiel der Brillanten ist also eine Erscheinung der Lichtbrechung und hat nichts Körperliches an sich. Vollkommen reine Diamanten sind ganz farblos und werden als „blauweiß" bezeichnet (Tiffanyit). So verhalten sich sehr viele Steine aus Indien und Brasilien, sowie von einzelnen südafrikanischen Fundorten, aus den River diggings im Vaalfluß, von Jagersfontein und von Deutsch-Südwestafrika. Die meisten Steine von Südafrika (Kapsteine), besonders von Kimberley, sind mehr oder weniger deutlich, meist kaum merklich, gelb. Nach dem Gelb ist wohl Grün am häufigsten, besonders in Brasilien, auch Braun und Grau ist recht verbreitet. Ausgesprochen und schön gefärbte durchsichtige Steine (Phantasiesteine) sind selten; am häufigsten ist hier Gelb, sehr sparsam tritt Grün und Rot auf, am seltensten ist schön Blau; schwarze, geschliffen besonders kräftig glänzend, kommen von Borneo. Die gefärbten Diamanten sind zum großen Teil trübe und unansehnlich und nicht vollkommen durchsichtig; dies führt hinüber zum Bort.

2. Diamantschleiferei. Sie unterscheidet sich entsprechend den besonderen Eigenschaften des Diamants in manchem von der gewöhnlichen Edelsteinschleiferei. Der rohe Stein, der ja, wie erwähnt, meist einen Brillant geben soll, wird, wenn er nicht schon von Natur Oktaederform besitzt, durch Spalten in diese gebracht. Er wird zu diesem Zweck in geeigneter Stellung auf einen Kittstock aufgeklebt und es wird dann mit der scharfen Spitze eines zweiten Diamanten über der Schneidebüchse, einem kleinen Kasten zum Auffangen des abfallenden wertvollen Pulvers, eine flache Rinne in der Richtung einer Spaltungsfläche eingerieben. In diese wird ein scharfer Meißel oder ein Messer in der Richtung dieser Fläche aufgesetzt und durch einen kräftigen Hammerschlag die Spaltung bewirkt. Man sucht so auch oberflächliche Fehler möglichst zu entfernen. Durch Wiederholung dieser Prozedur, die man als das Klieven bezeichnet, erhält man schließlich ein Spaltungsoktaeder, sogenanntes Kapje; natürliche Oktaeder heißen Pint, die abgespaltenen Stücke Enden. Letztere sind sehr dünn und daher besonders zu Rosetten geeignet, während die Pints und die Kapjes die Brillanten geben. Bei Zwillingen und anderen Steinen, die keine Spaltung gestatten, wird die Herstellung der oktaedrischen Grundform durch geeignetes Zersägen des Rohsteins hergestellt, wenn seine Beschaffenheit dieses umständlichere Verfahren lohnt. Die oktaedrischen Steine werden dann weiter verarbeitet, indem man zuerst die Tafel und die Kalette anschleift. Statt dessen wird aber in neuerer Zeit, wenn es irgend der Mühe wert ist, die Ecke über der Tafel durch Absägen entfernt. Dadurch wird, wie beim Spalten, dem Abschleifen gegenüber viel Zeit und Mühe erspart, auch bleibt das abgesägte Stück ganz und gibt noch einen kleineren Brillant. Die so orgerichteten Steine erhalten sodann die beabsichtigte Form im Rohen, indem man zwei auf Kittstöcken befestigte Diamanten über der Schneidebüchse an allen Stellen, die eine Facette erhalten sollen, kräftig aneinander reibt, bis diese in ihrer ersten rohen Anlage deutlich vorhanden ist. Die Oberfläche des Steines erhält so ein mattes, graues, metallisches Aussehen, daher nennt man diese Operation das Grauen oder Graumachen, auch das Reiben, Schneiden oder Bruttieren des Diamants. Man hat jetzt auch Maschinen zu diesem Zwecke.

Den Schluß des Ganzen bildet das Schleifen, das sich von dem oben beschriebenen Schleifen der anderen Edelsteine nur in unwesentlichen Punkten unterscheidet. Die durch Grauen vorbereiteten Steine werden mittels Schnellot (Schlaglot) in eine Doppe, ein kleines halbkugeliges kupfernes Gefäß hinten mit einem kupfernen Stiel, eingeschmolzen, in der Weise, daß nur eine gegraute Facette herausragt. Mit dem Stiel wird die Doppe in eine Zange von besonderer Form eingeschraubt, und mit aufgelagerten Gewichten auf die Oberseite der mit 2800 bis 3000 Touren in der Minute horizontal rotierenden stählernen Schleifscheibe gedrückt, und zwar nahe dem Rand, wo sie mit ölgetränktem Diamantpulver bestrichen wird. Meist stehen sich zwei solche Zangen zur Ausgleichung des Drucks auf derselben Schleifscheibe gegenüber. Dabei muß sorgfältig darauf gesehen werden, daß die Schleifscheibe den Stein nach der Richtung der geringsten Härte auf der betreffenden Fläche angreift, sonst schleift sich der Stein nicht oder doch sehr schwer.

Ist eine Facette fertig, was durch häufiges Nachsehen kontrolliert wird, so wird der Diamant durch Erhitzen des Lots gelockert und in einer für eine zweite Facette passenden Lage von neuem befestigt. In dieser Weise wird fortgefahren, bis alle Facetten vorhanden sind. Diese haben dann hier schon den höchstmöglichen Grad von Glanz, da das Schleifmittel genau die gleiche Härte hat wie der zu schleifende Stein. Eine besondere Politur ist in diesem Fall nicht nötig; das Schleifen wird daher beim Diamant auch als Polieren bezeichnet.

Die Diamantschleiferei soll 1476 von Ludwig von Berquem in Antwerpen erfunden worden sein, doch gab es sicher schon früher geschliffene Diamanten, die allerdings zum Teil nichts anderes waren, als natürliche Oktaeder mit polierten Flächen, sogenannte Spitzsteine. In alten Zeiten wurden die Diamanten ganz in ihrem rohen Zustand benutzt. Auch heute noch sind in Antwerpen zahlreiche Diamantschleifereien. Der Hauptsitz der Industrie ist jedoch jetzt Amsterdam, wo ca. 7000 Schleifapparate (skaifs) existieren und mehr als 12 000 Menschen, ausschließlich Juden, sich davon ernähren. Aber auch in Hanau, Idar, Berlin, Paris, London, New York und anderorts in den Vereinigten Staaten hat sich dieser Erwerbszweig eingebürgert.

Wert. Hierfür ist in erster Linie die Qualität entscheidend. Man unterscheidet in dieser Beziehung: Steine vom ersten (reinsten) Wasser, vollkommen farblos und durchsichtig, ohne jeden Fehler; Steine vom zweiten Wasser, vollkommen farblos, aber mit unwesentlichen kleinen Fehlern oder ganz schwach gefärbt, ohne Fehler; Steine vom dritten Wasser, mit größeren Fehlern oder einer merklichen Farbe (couleurte Diamanten). Die Unterschiede sind aber keineswegs ganz scharf. Alle noch geringeren Steine werden nur in der Technik verwendet (Bort), es wird aber alles geschliffen, was einigermaßen noch einen brauchbaren Schmuckstein liefert. Mit der Größe nimmt natürlich der Wert zu, und zwar etwas mehr als dem Gewicht entsprechend, aber nicht annähernd nach dem Quadrat des Gewichts (Regel von Tavernier). Die reichen südafrikanischen Funde haben namentlich für größere Steine die Preise gegen früher etwas gedrückt, aber nicht für die dort so spärlichen Steine der besten Qualität. Besonders große Diamanten werden Solitärs, Parangons oder Nonpareils genannt. Ihrer Kostbarkeit wegen sind sie vielfach mit besonderen Namen belegt worden, die unten zum Teil angeführt werden sollen. Auch der Schliff ist von Bedeutung. Ein Brillant ist wesentlich teurer als eine ebenso schwere Rosette von derselben Qualität. Fehler im Schleifen, unregelmäßige Anordnung der Facetten, einzelne zu große (überschliffene) Facetten usw. wirken sehr ungünstig. Die Preise sind natürlich Schwankungen unterworfen und können hier nicht weiter erörtert werden.

Verfälschung. Dem Diamant werden wegen seines hohen Werts alle möglichen farblosen Steine untergeschoben (farbloser Hyacinth, sogenannte Mataradiamanten, Leukosaphire, Topas, Bergkristall usw.) Der Kenner bemerkt das leicht, namentlich auch daran, daß ihnen allen das Farbenspiel fehlt. Erkennungsmerkmale sind die Härte, die Dichte, die einfache und sehr starke Lichtbrechung, eventuell die vollkommene Durchsichtigkeit gegen Röntgenstrahlen. Dem Aussehen nach wird der Diamant durch den Straß am besten nachgeahmt (s. S. 936).

3. Vorkommen. Fundorte. Nur in Südafrika sind die Diamanten in ihrem Muttergestein, dem Blaugrund, bekannt; überall sonst liegen sie in Seifen und über ihr ursprüngliches Vorkommen gibt es nur Vermutungen. Dies gilt auch für das eigenartige Auftreten in Deutsch-Südwestafrika im Dünensand.

Ostindien. Am längsten und schon im Altertum bekannt waren die Gruben in Ostindien. Von hier stammten bis zur Entdeckung des Vorkommens in Brasilien (ca. 1725) fast alle Diamanten, namentlich eine ganze Anzahl schöner großer, von denen noch die Rede sein wird. Verhältnismäßig viele indische Steine sind von der besten „blauweißen" Art. Die alten Gräbereien liegen in großer Zahl am Ostrande des Dekhan im Flußgebiete des Panar, Kistnah und Godavery. Viel genannt wird Golkonda bei Haiderabad, wo aber keine Gruben waren, sondern das als Hauptsitz des südindischen Diamantenhandels eine große Bedeutung hatte. Weiter im Nordosten liegen Fundorte im Gebiete des Mahanady und des Brahmani, ebenso im Norden im Bundelkund im Gebiet des Ken. Nur hier ist der Betrieb noch etwas im Gang und es werden in den Gruben bei Panna noch einige hundert Karat jährlich gewonnen, alle übrigen, einst zum Teil so reichen indischen Gruben sind gänzlich erschöpft. Die indischen Diamanten stammen aus altpaläozoischen Sandsteinen und sonstigen Trümmergesteinen, im Süden der unteren, im Bundelkund der oberen Vindhya-Formation, dort speziell der Banaganpilly-, hier der Rewah-Gruppe (den Pannaschichten) angehörig. Es sind Seifen der Vorzeit, die z. T. durch Zerfallen jener Gesteine neue moderne Seifen gebildet haben, aus denen die Steine durch Waschen gewonnen werden. Die ursprüngliche Lagerstätte der indischen

Diamanten ist, wenigstens mit Sicherheit, nirgends bekannt, man glaubt eine solche aber im Granit von Bellary gefunden zu haben.

Aus Indien stammen einige besonders große und schöne mit besonderen Namen bezeichnete Steine. Unsicher ist allerdings der größte, der Großmogul von 787½ Karat. Der größte bekannte ist der Orlow von 194¾ Karat im russischen Kronschatz. Der Regent im Besitz der französischen Regierung ist ein prächtiger ganz regelmäßiger Brillant von 136$^{14}/_{16}$ Karat; roh soll er 410 Karat gewogen haben. Der Kohinur im englischen Kronschatz, ein etwas zu niederer Brillant von 106$^{1}/_{16}$ Karat, war früher in Indien unregelmäßig geschliffen und wog so vor dem Verschleifen in Europa 186$^{1}/_{13}$ Karat. Der Florentiner in der Wiener Schatzkammer, 133$^{1}/_{5}$ Karat, ist etwas gelblich. Prächtig blau ist der Diamant von Hope, 44½ Karat. Grün ist ein Diamant von 48 Karat im Grünen Gewölbe in Dresden.

Borneo. Sehr lange bekannt ist auch das Vorkommen in Borneo, und zwar im Westen der Insel in der Gegend des Unterlaufs des Kapuas und des Landak in der Landschaft Landak, und im Südosten bei Bandjarmassim und Martapura in der Landschaft Tanah Laut, überall ausschließlich in Seifen. Die Jahresproduktion wird, wahrscheinlich zu hoch, auf 5000 Karat geschätzt. Von Borneo kommen u. a. schöne schwarze Kristalle, die kostbaren Trauerschmuck geben. Der größte Stein von Borneo, von dem berichtet wird, wurde in Landak gefunden; es ist der „Danau radja" von Taubeneigröße und 367 Karat Gewicht, der sich im Besitz eines einheimischen Fürsten befindet.

Brasilien. Im Jahre 1725 wurden, zufällig beim Goldgraben, die ersten Diamanten in Brasilien entdeckt, und zwar in der Nähe des jetzigen Diamantina, damals Tejuco, im Staat Minas Geraës. Auch in Brasilien findet sich der Edelstein nur in Seifen, besonders in den Wasserläufen, aber auch höher, an den Talabhängen und auf den Plateaus. Die diamantführenden Alluvionen der Bäche und Flüsse, vorzugsweise aus Quarzgeröllen mit spärlichen anderen Mineralien (favas, feijãos usw.) bestehend, heißen Cascalho, und wenn sie durch ein meist eisenschüssiges Bindemittel zu einem festen Konglomerat verkittet sind, Tapanhoacanga oder kurz Canga. Gorgulho heißen die diamantführenden Schuttmassen an den Talabhängen und auf den Plateaus. Das Gebiet von Diamantina im Oberlauf des Jaquetinhonha ist auch heute noch wichtig, viel weniger der weiter flußabwärts gelegene Bezirk von Grão Mogol (oder Mogor). Hier fand man Diamanten auch in einem feinkörnigen Sandstein, der fälschlicherweise für Itakolumit gehalten wurde. Westlich von Diamantina ist das längst erschöpfte Gebiet am Rio Abaëte, einem linken Nebenfluß des Rio S. Francisco. Von Bedeutung ist dagegen, noch etwas weiter westlich, der Landstrich um Bagagem, wo neben anderen die Gruben von Agua Suja guten Ertrag liefern. Von Bagagem stammt der lange Zeit größte brasilianische Diamant, der „Stern des Südens", der roh 254½ Karat wog. Wichtig sind auch die Wäschereien im Staat Bahia. Sie liegen zum Teil im Gebiet des oberen Rio Paraguassu in der Serra da Chapada und der Serra da Cincora (oder Sincora) zwischen Cincora im Süden und Lençoes im Norden. Hier findet sich neben dem gewöhnlichen Diamant in bis faustgroßen Stücken der koksähnliche schwarze poröse Carbonado, der in der Technik eine nicht unwichtige Rolle spielt. Erst 1881 entdeckt wurden in der nördlichen Fortsetzung des Bezirks von Diamantina die Diamanten in dem Grenzgebiet gegen Minas Geraës bei Salobro im unteren Flußgebiet des Rio Pardo. Diese ertragreichen Gruben werden nach der nahegelegenen Hafenstadt die Canavieirasgruben genannt. Auch die Staaten S. Paulo, Paranna, Goyaz und Mato Grosso haben zum Teil zahlreiche Diamanten geliefert, sie sind aber doch weniger wichtig und die Verhältnisse sind meist noch weniger bekannt.

Die brasilianischen Diamanten sind durchschnittlich von guter Qualität und stehen im allgemeinen hinter den indischen nicht zurück, doch sind die Cincora-Steine geringer als die von Diamantina. Die meisten sind klein und wiegen nur bis zu ¼ Karat. Steine von 1 bis 6 Karat sind schon selten, und noch größere kommen so wenig vor, daß früher ein Sklave für das Auffinden eines 17½ karätigen neben sonstigen Belohnungen die Freiheit erhielt. Der größte brasilianische Diamant, 1906 in Goyaz gefunden, wog ca. 300 Karat (Südstern siehe oben). Der große Braganza von 1680 Karat im portugiesischen Kronschatz ist wohl nur ein farbloses Topasgerölle. Die mit den Jahren stark wechselnde Produktion betrug 1903 bis 1907 für ganz Brasilien zusammen 206 956 Karat; von Anfang an (1730) bis 1907 hat Brasilien 15 316 987 Karat (ca. 3140 kg) geliefert.

Australien. Von geringerer Bedeutung ist das seit 1851 bekannte Vorkommen in Australien. Die australischen Diamanten sind außergewöhnlich hart, so daß sie lange Zeit der Bearbeitung erhebliche Schwierigkeiten bereiteten. Die Steine sind im Durchschnitt besser als die vom Kap, aber alle klein, meist nur ¼ bis

$^1/_3$ Karat schwer, der schwerste, gefunden 1905, wog 29 Karat, der bis dahin größte $5^1/_4$ Karat. Die Fundorte liegen in Queensland, Süd- und Westaustralien und in Victoria, einigermaßen wichtig ist aber nur Neu-Süd-Wales. Hier ist ein südlicher Bezirk, südwestlich und nordwestlich von Sydney im Gebiet des Shoalhaven und des oberen Lachlan, sowie des Macquarie mit seinen Nebenflüssen, Cudgegong usw., und ein reicherer nördlicher im oberen Flußgebiet des Gwydir und Horton bei Bingera, Inverell und Tingah, welcher letztere die heutige Produktion im wesentlichen liefert. Ueberall sind es Seifen, in denen die Diamanten von Gold, im Norden auch von Zinnstein begleitet sind. Sie liegen in alten Wasserläufen der Tertiärzeit über dem Niveau der heutigen Flüsse und fern von diesen, und sind von jüngeren Basaltdecken überlagert, unter denen sie hervorgeholt werden müssen.

Südafrika. Südafrika spielt heute die Hauptrolle in der Diamantenproduktion: mindestens neun Zehntel der Steine, die jährlich in den Verkehr kommen, stammen daher und der ganze Handel wird von hier aus beherrscht. Daneben spielen alle anderen Produktionsgebiete eine untergeordnete Rolle.

In der Kapkolonie wurde 1867 im Kiese des Oranje-Flusses bei Hopetown der erste Fund gemacht, dem, weiter unterhalb 1869 der zweite und letzte, der des $83^1/_2$ Karat schweren „Stern von Südafrika" folgte. Diamanten in größerer Menge wurden aber wenig später im Vaalfluß entdeckt. Hier sind noch heute Wäschereien im Betrieb, die sogenannten River diggings, zwischen Pniel (Klipdrift) und der Mündung des Hart in den Vaal, die zwar nicht viele, aber vorzüglich schöne Steine liefern. Die Jahresproduktion schwankt zwischen 50 000 und 100 000 Karat; der größte hier gefundene Diamant ist der „Stewart" von $288^3/_8$ Karat.

Sehr viel reicher ist der Blaugrund in den Pipes. Sie liegen fern vom Wasser oben auf dem Plateau, und der Betrieb geschah daher anfänglich im Trockenen, daher wurden diese Gräbereien als Dry diggings unterschieden. Die ersten Pipes wurden 1869 bis 1871 auf der dürren und öden Hochfläche zwischen Vaal und Modder nahe der damals noch nicht bestehenden, jetzt so bedeutenden Stadt Kimberley entdeckt und anfänglich ebenfalls für Seifen gehalten. Es ist deren dort jetzt eine ganze Anzahl bekannt, aber die meisten haben sich als zu arm erwiesen. Nur aus fünf werden noch jetzt Diamanten gewonnen. Auf ihnen bauen die Gruben: De Beers und Kimberley dicht bei der Stadt nach Osten, bezw. Westen, ferner Bultfontain, Dutoitspan und Wesselton (früher auch Premier-Mine genannt) einige Kilometer gegen Südost entfernt. Immer im Betrieb seit dem Anfang der siebziger Jahre ist aber nur die erste und, seit ihrer Eröffnung im Jahr 1890, die Wesselton-Grube, die De Beers-Grube von ihrer Eröffnung an bis zum Jahre 1908. Am reichsten ist die Kimberley-Grube, aber De Beers steht wenig hinter ihr zurück. Der Diamantenreichtum des Blaugrunds hat jedoch mit der Tiefe (entsprechend der Betriebsdauer) erheblich abgenommen, und zwar von 1,28 Karat im Load (Wagenladung, das in Kimberley übliche Maß, = 16 Kubikfuß engl. = 0,454 cbm = 725 kg ca.) im Jahr 1889 bis zu 0,37 Karat im Jahr 1908.[1]) Die Wesselton-Grube hat von 1897 bis 1908 fast ganz gleichmäßig 0,27 Karat im Load ergeben, in Bultfontein und Dutoitspan hat der Ertrag nach der Tiefe zugenommen, und zwar dort von 0,21 bis 0,32, hier von 0,12 bis 0,23 Karat.

Die Gruben bei Kimberley, besonders die Kimberley-Grube selber, waren anfänglich in quadratische Abteilungen von 31 Fuß engl. (9,45 m) Seite, sogenannte Claims, eingeteilt und diese wurden von den Besitzern ganz unabhängig voneinander am Tage bearbeitet. Aus dem gröblich zerkleinerten Blaugrund wurden dann die Diamanten in sehr primitiver Weise mit der Hand ausgelesen, da der herrschende Wassermangel eine rationelle Wäscherei nicht zuließ. Mit zunehmender Tiefe mehrten sich aber die Schwierigkeiten des Abbaus (Einsturz des umgebenden diamantfreien Gesteins, des reef, Wasserzudrang usw.) derart, daß die bisherige Methode nicht beibehalten werden konnte. Diese Umstände führten allmählich zu der am 1. April 1889 unter der Führung des bekannten Politikers Cecil Rhodes erfolgten Gründung der De Beer's Consolidated Mines Limited, die allmählich, mit einem Kapital von $4^1/_2$ Millionen Pfund alle Gruben bei Kimberley ankaufte und die heute, da sie auch die meisten anderen südafrikanischen Gruben, sowie einen Teil der brasilianischen kontrolliert, den ganzen Diamanthandel beherrscht. Konkurrenz erleidet sie hauptsächlich von der noch zu erwähnenden Premier mine in Transvaal und durch die Funde in Deutsch-Südwestafrika. Ihre Politik geht dahin, nur soviele Diamanten jährlich zu gewinnen, als sie voraussichtlich abzusetzen imstande ist. Ihre Gesamtproduktion übergibt sie zu vertraglich fest-

[1]) In den offiziellen Mitteilungen der De Beers-Gesellschaft wird stets über die Kimberley- und die De Beers-Grube gemeinsam berichtet; die Zahlen gelten demnach für beide zusammen.

gesetzten Preisen dem Londoner Diamantensyndikat, das die Steine dann seinerseits wieder partienweise an die Händler und Schleifer verkauft.

Die Gründung dieser Gesellschaft bedeutete einen ungeheuren Fortschritt für die südafrikanische Diamantenproduktion. Sie führte rationelle Gewinnungsmethoden ein, u. a. durch Beschaffung von Wasser mittels einer ergiebigen Wasserleitung, und durch Einführung eines geordneten unterirdischen Bergbaus in den für den Tagebau zu tief gewordenen Gruben Kimberley, De Beers und Wesselton, der in der erstgenannten Grube jetzt eine Tiefe von 1200, in der zweiten von 1000 m erreicht hat. Der gewonnene Blaugrund wird auf weiten umzäunten und scharf bewachten Flächen, den Floors, ausgebreitet und hier monatelang der Verwitterung überlassen, bis er, ganz zerfallen, in die Wäschereien gelangt, die auch die kleinsten Steinchen zu gewinnen gestatten. Sie arbeiten mit ihrer jetzigen vervollkommneten Einrichtung so vorteilhaft, daß es sich verlohnt, die Rückstände der alten Handscheidung und der früheren roheren Wäscherei, die sogenannten Débris und Tailings, noch einmal aufzuarbeiten. 1906/07 hat die De Beers-Gesellschaft neben 2 062 000 Karat Diamanten im Wert von 5 650 000 Pfund aus Blaugrund 558 000 Karat im Wert von 800000 Pfund aus jenen alten Rückständen gewonnen. Im Ganzen waren 3992 Weiße und 23769 Schwarze, zusammen also 27 761 Arbeiter dort beschäftigt. Im Betriebsjahr 1910/11 betrug die Gesamtproduktion der De Beers Consolidated Mines 2180856 Karat Diamanten im Gesamtwert von 4938087 Pfund Sterling, gegen 2416666 Karat im Wert von 5414896 Pfund im Vorjahr. Von 1870 bis 1909 sind aus den Gruben bei Kimberley ungefähr 90 347 750 Karat = 18 612 kg Diamanten im Werte von 2 644 553 400 M. gewonnen worden.

Im Gegensatz zu Indien und Brasilien ist die G r ö ß e der Diamanten bei Kimberley sehr bedeutend. Zwar überwiegen auch hier die kleinen, aber neben diesen sind die großen viel häufiger als dort und zahlreiche von Spaltungsflächen begrenzte Bruchstücke im Blaugrund lassen schließen, daß die Zahl der großen und sehr großen Steine anfänglich noch erheblich beträchtlicher war als jetzt. Während 17-karätige Steine in Brasilien sehr selten waren, findet man sie bei Kimberley zu Tausenden; kein Tag vergeht, an dem nicht ein Diamant von 50 bis 100 Karat vorkäme und Gewichte von 80 bis 150 Karat sind noch recht häufig. Solche, die geschliffen 75 Karat und mehr wiegen, sind in den wenigen Jahren der Gräberei bei Kimberley mehr gefunden worden als in Brasilien und Indien zusammen in den Jahrhunderten des dortigen Betriebs. Der größte schöne Stein aus den Gruben bei Kimberley wog roh 474 Karat und gab einen Brillant von 200 Karat; ein schlechter Stein von da war sogar $503^1/_4$ Karat schwer. Zwei andere berühmte große und schöne Steine aus den Gruben bei Kimberley sind der „Imperial“ oder „Great White“, meist „Victoria“ genannt, $457^1/_2$ Karat schwer und zu einem Brillant von 180 Karat geschliffen; die Grube, aus der er stammt, ist nicht bekannt. Der andere ist der größte aus der De Beers-Grube stammende Diamant, nach der er daher auch „De Beers“ genannt wurde; er wog $428^1/_2$ Karat und lieferte einen Brillant von 225 Karat. Das Durchschnittsgewicht aller Diamanten von Kimberley kann man, abgesehen von den ganz kleinen, zum Schleifen nicht mehr tauglichen, jedenfalls auf mehr als 1 Karat veranschlagen. Die gewöhnliche in Partien gehandelte Ware geht bis 50 und 60 Karat pro Stück; nur die noch größeren Steine werden einzeln verkauft.

Im Gegensatz zu der bedeutenden Größe ist die Q u a l i t ä t der Kapsteine im allgemeinen untergeordnet. Einschlüsse und andere Fehler sind häufig. Namentlich werden die Steine durch einen mehr oder weniger ausgesprochenen Stich ins Gelb etwas entwertet. Solche gelbliche Diamanten werden zuweilen betrügerischerweise mittels eines dünnen Ueberzugs einer blauen Substanz (Eintauchen in eine blaue Flüssigkeit und Trocknen) durch Kontrastwirkung scheinbar farblos und damit wertvoller gemacht. Häufig ist der Stich ins Gelb fast unmerklich, so daß er dem Ungeübten ganz entgeht (Kapweiß), vielfach ist aber das Gelb auch etwas deutlicher erkennbar (bywater). Die Hauptmasse der Schleifware ist lichtgelb bis orange und hell kaffeebraun (off coloured bis dark yellow), während rein weiße (blauweiße) Exemplare nur zu 2 % vorhanden sind. Je ausgesprochener die Farbe, desto niedriger ceteris paribus der Wert. Aber auch schön gelb gefärbte „Phantasiesteine“ sind durch die Funde am Kap gegen früher häufiger geworden, während schöne blaue, grüne und rote auch dort zu den größten Raritäten gehören. Nach G. F. K u n z sind 8 % vom ersten, 12 % vom zweiten, und 25 % vom dritten Wasser, der Rest ist Bort. Eigentümlich sind die nicht ganz seltenen rauchgrauen „smocky stones“, die einige Zeit nach ihrer Gewinnung ohne erkennbare äußere Ursache in Stücke zerspringen.

Die Qualität ist auch mit den Gruben verschieden. Am besten ist sie in Dutoitspan, am schlechtesten in Bultfontein und Wesselton. Dies zeigen die folgenden Grubenpreise

pro Karat vom Jahr 1908: Dutoitspan: 74½ M.; Kimberley und De Beers: 58 M.; Bultfontein: 41½ M.; Wesselton 39 M.

Neben den Gruben bei Kimberley ist keine andere in der Kapkolonie von Bedeutung. Wie hier finden sich auch in der Oranjefluß-Kolonie die Diamanten vorzugsweise im Blaugrund der pipes. Die Verhältnisse sind von denen der Kapkolonie nicht wesentlich verschieden, doch ist die Produktion weit geringer als bei Kimberley und in Transvaal. Sie beträgt zurzeit gegen 350 000 Karat im Wert von 950 000 Pfund. Die reichliche Hälfte davon fällt auf die seit 1871 bekannte Jagersfontein-Grube etwas südlich von Fauresmith. Sie ist nicht so reich wie die Kimberley-Gruben, liefert aber eine bessere Durchschnittsqualität und viele blauweiße Steine. Von hier stammt der bis 1905 größte bekannte Diamant, der 1893 gefundene „Excelsior" von 969½ Karat. Er ist vom reinsten Wasser und wurde seiner Unverkäuflichkeit wegen später in 10 Stücke zerlegt, die geschliffen zusammen $340^{13}/_{32}$ Karat wiegen. Ein zweiter großer Stein von hier ist der „Jubilee", auch Reitz-Diamant oder Imperial, von 634, als Brillant 239 Karat; er ist gleichfalls von tadelloser Qualität. Die anderen Gruben dieser Kolonie, Roberts Victor oder Damplaats östlich Kimberley, Lace-Grube und Vorspoed westlich Kronstaad, Koffyfontein usw., sollen als wenig wichtig nur im Vorbeigehen genannt werden.

In Transvaal werden teils in Seifen, teils im Blaugrund seit 1897 Diamanten gefunden, und zwar beträgt die Produktion seit 1898: 12 283 Karat in Seifen, 10 560 in Pipes, zusammen 22 843 Karat. Ein Riesenaufschwung erfolgte durch die 1903 erfolgte Eröffnung der Premier-Grube auf einer nahe der Bahnlinie Pretoria-Delagoabay, 38 km von Pretoria, bei der Station van der Merve entdeckten pipe. Gegen ihren Reichtum treten alle anderen Gruben Südafrikas in den Schatten. Die Pipe ist ganz besonders groß (900 m lang, 600 m breit, 28½ ha im Querschnitt); sie enthielt oben 1,29 Karat im Load, was sich nach der Tiefe auf 0,29 Karat ermäßigt. Der Jahresertrag gibt dem bei Kimberley nicht nach und beträgt gegen 2 Millionen Karat im Wert von nicht ganz 2 Millionen Pfund. Die Gesamtproduktion beläuft sich bis 1911 auf ca. 10 Millionen Karat im Wert von gegen 10 Millionen Pfund. Die Qualität ist allerdings im allgemeinen nicht besonders, doch wurde hier am 26. Januar 1905 der bis jetzt größte Diamant, der fast faustgroße „Cullinan" gefunden, der 3030¼ Karat = 621,2 g wog. Er ist von der besten Beschaffenheit und nur ein Stück eines noch größeren Kristalls, da er an einer Seite von einer Spaltungsfläche begrenzt wird. Die Regierung von Transvaal schenkte ihn dem König Eduard VII. von England, der ihn zerlegen und schleifen ließ. Die drei größten Stücke haben herrliche Brillanten von 516½, 309 und 92 Karat gegeben. Die Gesellschaft, der die Grube gehört, ist von der De Beers-Gesellschaft unabhängig und macht ihr nach zeitweisem Zusammengehen scharfe Konkurrenz.

Die Diamantfunde in Rhodesia sind spärlich und ohne jede wirtschaftliche Bedeutung, ebenso die, vielleicht sogar noch nicht einmal ganz sicheren im belgischen Kongo-Gebiet und in Liberia.

Die Gesamtproduktion von Südafrika wird für die 10 Jahre vor der Entdeckung der Diamanten in Deutsch-Südwestafrika folgendermaßen angegeben (in Karaten):

1898	3 025 039	1903	2 607 024
1899	3 261 135	1904	3 450 631
1900	1 435 689	1905	3 498 368
1901	2 532 955	1906	3 508 210
1902	2 650 193	1907	5 002 962

Zusammen: 30 972 206 Karat = 6380¼ kg ca.

1908 waren die Zahlen wegen der Ueberproduktion von 1907 und wegen des schädlichen Einflusses der amerikanischen Geschäftskrisis viel niedriger, später hoben sie sich wieder. Die kleine Zahl für 1900 erklärt sich aus dem Burenkrieg.

Deutsch-Südwestafrika. Der Blaugrund bei Gibeon und Berseba hat noch keine Diamanten geliefert. Die ersten Steine traf man im Frühjahr 1908 östlich Lüderitzbucht beim Bahnbau im Dünensande. Seitdem haben sich die Funde, überall auf sekundärer Lagerstätte, rasch gemehrt, aber es ist noch nicht gelungen, die primäre Lagerstätte der Diamanten zweifellos festzustellen. Man kennt sie jetzt von der Empfängnisbucht im Norden (24° s. Br.), bis Angras Juntas im Süden (28° s. Br.) in einem bis 20 km breiten Küstenstrich. Nördlich von der Elisabethbucht liegen sie im Dünensande, südlich, wo die Wanderdünen fehlen, in der Küste parallelen langgestreckten Trockentälern in ähnlichen sandigen Kiesen wie weiter nördlich, oder auf dem nackten Felsboden, wobei in beiden Gebieten reiche und arme Strecken miteinander abwechseln, im großen sowohl als im kleinen. Besonders reiche Nester entdeckte man im Pomonagebiet südlich Lüderitzbucht (ca. 27¼° s. Br.). Die Dünen bestehen aus 70 bis 80 % Feinsand und 20 bis 30 % feinem buntem Kies, vorzugsweise Chalcedon und Achat, Granat usw. Diese Kiese werden durch Fortwehen des Feinsandes durch den Wind vielfach angereichert und an solchen Stellen findet sich der Diamant. Die produktive Schicht

ist nur 10 bis 40 cm mächtig, so daß vielleicht der zu gewinnende Vorrat bald erschöpft ist. Der Gehalt des Kieses schwankt zwischen $^1/_4$ und $^4/_5$ Karat pro Quadratmeter doch hat man auch schon 1,27 Karat gewonnen. Ein Feld ergab in 1 cbm Kies 2,4, ein anderes 5,3 Karat, letzteres entsprechend 20 bis 25 Steinen der gewöhnlichen Größe. Diese bleibt überall ziemlich gleich, 4 bis 5 Steine von der Größe einer kleinen grünen Erbse auf 1 Karat, nur östlich von der Elisabethbucht steigt das Einzelgewicht auf $^3/_4$ Karat. Die zwei größten bisher bekannt gewordenen Steine von 10 und $17^1/_4$ Karat kommen aus dem Bogenfelsfeld südlich Lüderitzbucht (ca. $27^1/_2{}^0$ s. Br.), nach Norden zu nimmt sie immer mehr ab. Die Qualität ist im ganzen vorzüglich, wasserklar, auch gelblich und tiefgelb, andere Farben sind seltener. Der Durchschnittswert beträgt ca. 30 M. pro Karat. Abgerollt sind die Steine nicht, die Kristallform ist in den meisten Fällen gut erhalten. Verschiedene Gesellschaften betreiben die Gewinnung. Diese ist sehr einfach und geschieht entweder durch Ablesen oder gründlicher durch Sieben. Der Feinsand wird so vom Feinkies getrennt, dieser wird wieder mit Sieben im Wasser bearbeitet, so daß sich die Diamanten mit den anderen schweren Mineralien unten im Sieb ansammeln. Sie bilden zusammen das „Herz", aus dem die Diamanten ausgelesen werden. Neuererzeit sind auch rationelle Wascheinrichtungen angelegt worden. Die Gesamtförderung betrug in Karat: 1908: Oktober: 6263, November: 8295, Dezember: 9330; zusammen: 23 888. 1909: Januar: 15 126, Februar: 15 510, März: 22 803, April: 30 592; Mai: 33 309, Juni: 37 554; Juli: 45 333; zusammen: 200 227. Seit 1. März 1909 müssen alle Produzenten ihre Gesamtfunde behufs Verkauf der Diamantenregie abliefern und $33^1/_3$ % des Wertes Ausfuhrzoll zahlen.

Im ersten Geschäftsjahr wurden von 18 Förderern 560 977 Karat eingeliefert und auch verkauft. Davon gingen 79,50 % nach Antwerpen und Brüssel, der Rest nach Amsterdam (10,90 %), Deutschland (6,32 %), London, New York und Paris.

Ohne wirtschaftliches Interesse ist das Diamantvorkommen in Lappland, im Ural und in Sibirien, in Britisch-Guayana, in Nordamerika und in Meteoriten. Davon wird daher hier nicht weiter die Rede sein.

II. Andere Schmucksteine.

1. Korund. Der an sich farblose und durchsichtige Edelkorund zeigt wegen der häufigen Anwesenheit von Pigmenten eine große Mannigfaltigkeit in der Färbung und wird danach in zahlreiche, besonders benannte Varietäten geteilt. Vorzugsweise sie sind es, die durch die Bezeichnung „orientalisch" von anderen ähnlich gefärbten, weniger kostbaren Edelsteinen unterschieden werden. Diese übrigens in ihrem Wert als Edelsteine recht verschiedenen Farbenvarietäten sind die folgenden: Rubin (orientalischer Rubin): rot; Saphir (orientalischer Saphir): blau bis farblos (Leukosaphir); orientalischer Aquamarin: hell bläulichgrün bis grünlichblau; orientalischer Smaragd: smaragdgrün; orientalischer Chrysolith: gelblichgrün; orientalischer Topas: gelb; orientalischer Hyazinth: gelbrot; orientalischer Amethyst: violett. Die Farben von ihnen allen bewahren ihre Schönheit auch bei Lampenlicht, während andere Edelsteine bei künstlicher Beleuchtung vielfach unansehnlich werden. Die meisten Edelkorunde können künstlich mit allen ihren natürlichen Eigenschaften und mit ihrer vollen Edelsteinqualität reproduziert werden (synthetischer Rubin; s. unten).

a) Rubin. Die rote Farbe zeigt verschiedene Nuancen. Am geschätztesten, aber auch am seltensten, und daher am wertvollsten ist das reine tiefe, die Durchsichtigkeit nicht hindernde Karminrot, das die Birmanen als Taubenblutrot bezeichnen. Die meisten Steine haben aber einen mehr oder weniger deutlichen Stich ins Violette oder ins Blaue, weniger verbreitet ist ein solcher ins Gelbe. Häufig ist die Farbe ganz hell, rosenrot bis rötlichweiß, dies geht durch alle Zwischenstufen bis zum ganz dunklen Rot, das die Durchsichtigkeit beeinträchtigt. Nicht selten ist die Färbung nicht gleichmäßig, sondern rot und weiß gefleckt. Durch Glühen leidet die rote Farbe nicht; sie verschwindet wohl für den Augenblick, kehrt aber bei der Abkühlung, häufig nach dem Durchlaufen einer grünen Zwischenstufe, in der früheren Weise zurück. Die Ursache ist wohl ein kleiner Chromgehalt; der Pleochroismus ist ziemlich kräftig und muß beim Schleifen berücksichtigt werden. Manchmal sieht man eine Lichterscheinung wie bei dem Sternsaphir (s. unten) (Sternrubin, Rubinasterie). Das Hauptvorkommen besonders der schönst gefärbten Rubine ist Ober-Birma, wo man, außer an einigen anderen Orten, vor allem in der Gegend von Mogouk östlich von Mandalay (ruby tract) das Mineral als Kontaktprodukt in dem durch Granit umgeänderten Kohlenkalk findet und aus diesem ausgewittert in Seifen, oberirdisch und in Höhlen, die durch Auflösung des Kalks entstanden sind. Viele Steine sind schön und nicht wenige von der hochgeschätzten Taubenblutfarbe, aber sie sind fast alle klein, viel leichter als 1 Karat; Karatsteine sind schon selten. Schwerere von der besten Sorte, schon von

3 bis 4 Karat außerordentlich selten und noch größere kommen nur ganz ausnahmsweise einmal vor. Der Rubin wird von Saphir, sowie von anderen Edelkorunden in mehr oder weniger reichlicher Menge begleitet. Von geringerer Bedeutung ist das Vorkommen in den Edelsteinseifen von Ceylon; hier überwiegt unter den Korunden der Saphir, und die Rubine sind meist licht, wennschon einzelne schön gefärbte, auch taubenblutfarbige, nicht fehlen. Wenig geschätzt sind die Steine von Siam wegen eines mehr oder weniger deutlichen Stichs ins Gelb, Orange oder Braun; sie finden sich in Seifen in der Provinz Tschantabun südöstlich von deren Hauptstadt gleichen Namens. Wenig bekannt sind die Gruben in Badakschan im Gebiet des oberen Oxus. Etwas Material liefern auch Australien und die Vereinigten Staaten. Geschliffen wird der Rubin nicht selten en cabochon, meist erhält er aber Brillantform, jedoch etwas niederer als beim Diamant, auch Treppenschliff und die damit zusammenhängenden Formen sind verbreitet. Der tadellose taubenblutfarbige Rubin ist weitaus der kostbarste aller Edelsteine, namentlich wenn die rote Farbe einen samtartigen Schimmer zeigt. Ein solcher Stein ist viel wertvoller als ein gleichschwerer Diamant der besten Sorte von demselben Gewicht. Dies gilt schon für 1 Karat, so daß Rubin mindestens doppelt so teuer ist als Diamant. 3- bis 6karätige Rubine sind schon zehnmal so teuer, für sie gelten wegen ihrer großen Seltenheit keine eigentlichen Markt-, sondern nur von Fall zu Fall zu vereinbarende Phantasiepreise und dies gilt in erhöhtem Maße für noch schwerere, die, wie schon erwähnt, kaum vorkommen. Blasse und schlechtere Farben mit einem Stich ins Violett oder Gelb, sowie Fehler drücken den Wert stark herab, oft auf wenige Mark pro Karat. Von anderen durchsichtigen roten Steinen, Granat, Spinell, Turmalin, Rosatopas usw. unterscheidet sich der Rubin, außer für den Geübten im Aussehen, durch seine große Härte und Dichte (4,0 ca.), sowie z. T. durch Doppelbrechung und Pleochroismus.

b) Saphir. Die Farbe geht von ganz farblos, höchstens mit einem blauen Schein (Leukosaphir), durch alle möglichen Uebergänge ins Blau bis zum dunklen Indigo. Auch die Leukosaphire werden manchmal geschliffen und gelegentlich dem Diamant untergeschoben. Wenig geschätzt sind die ganz dunklen „tintigen" Farben und ebenso zu hellblaue Steine (Wasser- oder Luchssaphir) und solche mit einem Stich ins Grün oder Violett. Am beliebtesten und kostbarsten ist ein reines Kornblumenblau, namentlich in Verbindung mit einem schönen samtartigen Schimmer. Eine fleckenartige Verteilung von Blau und farblos ist sehr häufig, nicht selten sind auch gelbe und rote Flecken. Der Pleochroismus ist ziemlich stark, die dunkelste Farbe auf der Basis. Das Pigment wird beim Glühen zerstört und das schöne Blau geht in ein unansehnliches Grau über. Durch Radiumbestrahlung wird der Saphir gelb. Nicht selten ist der Sternsaphir (Asterie), auf dessen Basis, namentlich wenn er über ihr flach mugelig geschliffen ist, ein Lichtschein in Form eines mehr oder weniger deutlichen sechsstrahligen farblosen hellglänzenden Sterns entsteht, dem aber allerdings auch einzelne Arme fehlen können. Im übrigen wird der Saphir ebenso geschliffen wie der Rubin. Der Saphir ist auch in den schönsten kornblumenblauen, samtartig schimmernden Exemplaren viel häufiger als Rubin von der besten Sorte, auch größere Steine dieser Art sind nicht zu selten. Der Wert ist dementsprechend erheblich niedriger als beim Rubin und für Karatsteine etwa gleich dem des Diamants. Bis 10 Karat findet eine Steigerung ungefähr nach dem Gewicht statt, bei höheren Gewichten ist die Zunahme etwas rascher; Fehler, fleckige, zu helle oder zu dunkle Farbe, Trübung, Risse usw. drücken auch hier den Wert bedeutend, unter Umständen beinahe auf Null herunter. Weitaus die meisten Saphire kommen gegenwärtig aus der Provinz Tschantabun in Siam, wo sie, wie die dortigen Rubine aus Seifen gewonnen werden. Aber das Gebiet der Saphirgruben nordwestlich von der Provinzialhauptstadt ist von dem der Rubingruben durch den Kamm des Patatgebirges getrennt. Die meisten siamesischen Steine sind klein und dunkel grünlichblau, doch fehlen auch solche von der schönsten Farbe und von erheblicher Größe nicht. In den Edelsteinseifen von Ceylon im Süden und Südwesten der Insel im Distrikt Saffragam, besonders in der Umgegend von Ratnapura, spielt der Saphir, begleitet von Rubin und anderen Edelkorunden, von Turmalin, Spinell, Chrysoberyll, Zirkon, Quarzmineralien, Granat, Cordierit usw. eine Hauptrolle. Die meisten Saphire von hier sind blaß und fleckig, doch finden sich auch viele der besten Art, sowie Sternsaphire, die sonst weniger vorkommen. Große Mengen schöner Saphire wurden früher im Bezirk Zanskar in Kaschmir gewonnen und auch jetzt soll dort noch ein erheblicher Vorrat liegen, der aber zur Vermeidung von Preisdruck nur allmählich in den Handel gebracht wird. In Birma wird der Rubin von etwas Saphir begleitet, nicht selten schöne und große Steine. Sehr reich an Saphiren sind

die Vereinigten Staaten, namentlich in Montana. Die Steine sind hier klein, nicht über 9 Karat schwer und meist blaß, aber die Farbe ist sehr mannigfaltig; die Fundorte liegen in verschiedenen Bezirken, so bei Helena in den Schotterterrassen im Missouriltal, den sogenannten bars und in einem verwitterten Andesit im Yogodistrikt in Fergus County, auch hier einzelne Steine von schönstem Blau. Australien liefert zurzeit viele Saphire, aus Seifen in der Gegend der Zentralbahnstation Anakie in Queensland. Die Farbe ist meist grünlichblau. Andere Fundorte sind für den Edelsteinhandel nicht von Bedeutung. Künstlich kann er jetzt ebenfalls hergestellt werden.

c) Andere Edelkorunde. Von den andersgefärbten Edelkorunden sind nur der gelbe und der violette noch erwähnenswert. In mehr oder weniger reichlicher Menge begleiten sie den Rubin und den Saphir an den genannten Fundorten, besonders in Ceylon. Ihr Wert ist ungefähr gleich dem des Saphirs. Der gelbe Saphir (Topassaphir oder orientalischer Topas) ist mehr oder weniger tief gefärbt und nicht selten in charakteristischer Weise etwas wolkig getrübt, wie niemals der eigentliche Topas oder der gelbe Quarz (Citrin), die er geschliffen an Glanz übertrifft. Auch er zeigt zuweilen die Sternerscheinung (Topasasterie). Der violette Saphir (orientalischer Amethyst, Violettsaphir oder Amethystsaphir) hat stets einen deutlichen Stich ins Rot, mehr als der eigentliche Amethyst. Er wird ebenfalls geschliffen glänzender als dieser und ist stärker pleochroitisch. Am seltensten ist der schön smaragdgrüne orientalische Smaragd. Alle werden wie Rubin und Saphir geschliffen. Von ähnlich gefärbten anderen Steinen unterscheiden sich alle Edelkorunde durch dieselben Merkmale wie der Rubin, sowie dadurch, daß die Farbe bei künstlicher Beleuchtung (Lampenlicht) ihre Schönheit behält, während sie bei jenen meist unansehnlich wird.

3. Spinell. Von einigem Interesse als Edelstein ist nur der durchsichtige rote und blaue Edelspinell. Der rote Spinell zeigt alle möglichen Nuancen und wird danach auch verschieden benannt. Der schön rubinrote und auch recht wertvolle Rubinspinell gleicht dem Rubin sehr und wird ihm gelegentlich untergeschoben. Balasrubin heißt der blaßrote; er ist zuweilen eigentümlich trübe. Rubicell ist der bräunlich- oder gelblichrote (Essigspinell); der Almandinspinell hat einen Stich ins Violett und gleicht daher dem Almandingranat, von dem er geschliffen fast nicht mit Sicherheit unterschieden werden kann, da Dichte, Härte und optische Verhältnisse, auch Brechungsindizes fast genau dieselben sind. Durchsichtiger blauer Spinell ist noch nicht lange bekannt. Die Farbe ist ähnlich, aber etwas düsterer als bei guten Saphiren und geht zuweilen etwas ins Grüne. Er kommt, stets in Form oktaedrischer Kristalle, ausschließlich aus Ceylon. Von hier stammen auch viele rote Edelspinelle, diese begleiten aber auch sonst den Rubin mehr oder weniger reichlich. Geschliffen werden die Spinelle wie Rubin und Saphir; sie erhalten dabei einen kräftigen Glanz. Von Rubin und Saphir unterscheiden sich die Spinelle durch ihre einfache Lichtbrechung und den fehlenden Pleochroismus.

4. Chrysoberyll. Es gehört hierher der eigentliche Chrysoberyll und der Alexandrit, die sich wesentlich nur durch die Farbe unterscheiden. Chrysoberyll ist spargel- bis olivengrün oder gelb, auch gelblichbraun bis braun, manchmal ganz durchsichtig, manchmal etwas getrübt und dann oft mit einem beim Drehen des Steins über dessen Oberfläche hinwandernden, milchig matten, sogenannten „wogenden" Lichtschein, der sich auf der mugeligen Oberfläche mehr oder weniger regelmäßig geradlinig hinzieht. Namentlich diese Erscheinung (Chatoyieren) ist geschätzt, und die Steine, die sie schön zeigen, sind sehr wertvoll. Man nennt sie als Mineral Cymophan, als Edelstein Katzenauge, speziell orientalisches Katzenauge im Gegensatz zu dem ähnlich aussehenden Quarzkatzenauge (s. unten). Der schleifbare Chrysoberyll mit oder ohne Lichtschein kommt aus den Edelsteinseifen von Ceylon, von der Küste von Malabar in Südindien und als Begleiter des Turmalins usw. aus den Pegmatiten von Minas Novas im Staate Minas Geraës in Brasilien, aus denen er auch in die dortigen Seifen gelangt. Der Alexandrit ist selten vollkommen durchsichtig, aber sehr schön smaragdgrün, jedoch nur im Tages-, nicht bei Kerzenlicht: in diesem wird er ausgesprochen rot bis violett. Diese Erscheinung beruht auf der fast vollständigen Absorption des gelben und blauen Lichts in solchen Steinen, so daß nur rotes und grünes, beides in ungefähr gleicher Menge, hindurchgehen kann. Je nachdem das einfallende Licht mehr rote oder grüne Strahlen enthält, wird die Erscheinung des Steines so oder so sein. Man sieht ganz dasselbe bei manchen Flüssigkeiten, z. B. bei der durch Erhitzen grün gewordenen Lösung von Chromalaun. Der beim Alexandrit ziemlich starke Pleochroismus hat also keinen Teil an dieser Farbenänderung. Schöne durchsichtige Steine sind sehr wertvoll. Sie werden besonders in Rußland getragen und geschätzt. Hier wurden die ersten Alexandrite gefunden, und zwar im Glimmerschiefer an der Tokowaja nahe Katharinen-

burg im Ural am Tage der Großjährigkeitserklärung des nachmaligen Zaren Alexander II., nach dem das Mineral den Namen erhalten hat. In neuerer Zeit haben auch die Edelsteinseifen in Ceylon einige Steine geliefert, zum Teil mit dem Lichtschein des Katzenauges (Alexandritkatzenauge). Unter den synthetischen Edelsteinen sind solche, die eine ähnliche Farbenänderung zeigen wie der Alexandrit, aber in helleren Farben und das Grün mehr bläulich (synthetischer Alexandrit); die Untersuchung hat aber gezeigt, daß dies kein Alexandrit, sondern echter synthetischer Edelkorund ist, der sich an den Saphir anschließt, von dem auch einzelne natürliche Steine einen solchen Farbenwechsel zwischen Blau und Rot zeigen.

5. **Beryll.** Die als Edelsteine verwendbaren durchsichtigen Berylle sind verschieden gefärbt und führen danach verschiedene Namen. Smaragd: rein grün; Aquamarin: gelblich- oder bläulichgrün bis grünlichblau, zuweilen reinblau; Goldberyll: gelb; Aquamarinchrysolith: gelb mit einem Stich ins Grünliche. Farblose Edelberylle kommen wohl kaum im Edelsteinhandel vor. Rosa Beryll (sogenannter Morganit wird gegenwärtig in einiger Menge in Madagaskar gefunden, ist aber sonst selten.

a) Smaragd. Infolge eines kleinen Chromgehalts rein grün: smaragdgrün bis grasgrün, vielfach dunkel, meist aber heller bis fast farblos, auch in verschiedenen Nuancen gefleckt. Ganz vollkommen durchsichtig ist der Smaragd fast nie, meist ist er durch feine Risse etwas getrübt (moosig), auch kleine Einschlüsse, z. B. von Glimmer, kommen häufig vor. Bei keinem anderen Edelstein sind vollkommen durchsichtige tadellose Exemplare schon von geringer Größe so selten wie hier. Je tiefer gefärbt, je reiner und durchsichtiger der Smaragd ist, desto höher ist der Wert, besonders wenn der Stein den geschätzten samtartigen Schimmer zeigt. Er entspricht dann dem der besten Rubine und übertrifft weit den des Diamants. Hellere Farben sind häufig und sehr wenig beliebt. Bei Lampenlicht ändert sich die Farbe nicht. Geschliffen wird der Smaragd besonders als Treppenstein mit seinen Nebenformen und als Tafelstein. Fehlerlose Exemplare faßt man à jour, hellere im Kasten mit grüner Folie, die die Schönheit bedeutend hebt. Auch die Baroqueform kommt nicht selten bei Anhängern, ohne Fassung ringsum, vor. Vorkommen in Seifen ist beim Smaragd nicht bekannt. Die besten Steine gewinnt man heutzutage in den schon den Ureinwohnern und den spanischen Eroberern bekannten Gruben in der Cordillera oriental von Bogotá in Colombia, wo namentlich in der Nähe des Dorfes Muzo schöne Kristalle auf Kalkspatadern im dunkeln Schiefer der Kreideformation sich finden. Von hier stammen wohl auch die vielen und schönen Smaragde, die die Spanier in Mexiko und Peru erbeuteten, wenigstens sind gegenwärtig keine Fundorte daselbst bekannt; auch die in Nordamerika sind unbedeutend. Wichtiger ist der Smaragd von der Tokowaja nahe Katharinenburg im Ural, wo bis daumengroße Kristalle in Glimmerschiefer eingewachsen sind, begleitet von Alexandrit, Phenakit usw.; die Qualität steht hier zum Teil hinter der von Muzo nicht zurück. Ganz ähnlich ist das Vorkommen am Smaragdpalfen im Salzburgischen, aber die Kristalle sind klein und meist hell gefärbt und unrein und selten durchsichtig genug. Im Glimmerschiefer liegen auch die Smaragde in den Gruben von Oberägypten nahe dem Roten Meer am Dschebel Sakketto und Zabara, von wo wahrscheinlich die alten Aegypter und die Römer ihren Bedarf bezogen; man hat später die alten Gruben wieder aufgemacht, aber ohne nachhaltigen Erfolg, da die Qualität im ganzen zu gering war. Nachahmungen des Smaragds sind häufig. Smaragdolin ist ein grünes beryllhaltiges Glas mit Rissen wie im natürlichen Smaragd genannt worden; die sogenannten synthetischen Smaragde sind Dubletten aus zwei Bergkristallteilen mit einer durchsichtigen grünen Zwischenschicht, öfters aus Gelatine. Die Erkennung ist mittels der gewöhnlichen mineralogischen Methoden leicht, ebenso die Unterscheidung von anderen grünen Edelsteinen.

b) Aquamarin. Seine Farbe ist mit der des Meerwassers verglichen worden, woher der Name. Die meist langgezogenen Prismen pflegen im Gegensatz zum Smaragd sehr rein und klar durchsichtig, gleichmäßig gefärbt und frei von Rissen und Einschlüssen, überhaupt fehlerfrei zu sein. Geschliffene Steine, Brillant- und Treppenform, Tafelschnitt, auch Berloques und Brioletts, sind sehr glänzend; wegen der lichten Farbe muß man dem Stein eine genügende Dicke geben, was sich leicht machen läßt, da größere Kristalle häufig sind. Das Vorkommen, häufig mit Topas, ist meist auf Drusen pegmatitischer Gesteine, und in den daraus entstandenen Seifen, so in Brasilien im Bezirk Minas Novas im Staat Minas Geräes mit Turmalin, farblosem Topas, Chrysoberyll usw., schwach grünlich; im Ural in der Nähe von Katharinenburg, und zwar bei Schaitanka, sowie besonders schön und mannigfaltig in der Farbe, auch farblos und rosa bei Mursinka an der Keiwa, ferner an der Tokowaja mit Smaragd und im Ilméngebirge im Ural bei Miask. Blauen Aquamarin findet man im Altai und in Madagaskar.

Wichtig ist das Vorkommen im Nertschinsker Kreis in Transbaikalien, und zwar in dem granitischen Bergzug von Adun-Tschilon zwischen dem Onon und Onon-Borsja, mit Topas usw., meist grünlichblau, doch auch gelblich, zum Teil im Gestein, dem sogenannten Topasfels, zum Teil lose in der Erde; ferner in dem Borschtschowotschnoi-Gebirgszug zwischen der Schilka und Unda, besonders in den Granitbergen längs der Urulga, eines rechten Nebenflusses der Schilka. Die Kristalle von hier sind besonders groß, rein und schön, meist gelblichgrün, auch farblos, blau und gelb. Geschliffen werden auch einzelne Steine aus Ostindien, Australien und Nordamerika, wo aber kein Vorkommen wichtig ist.

c) Goldberryll und Aquamarinchrysolith. Diese Beryllvarietäten sind selten und ohne Bedeutung. Den ersten Namen führen die spärlich vorkommenden prächtig goldgelben Edelberylle, den letzteren die etwas ins Grüne gehenden. Sie begleiten in geringer Menge den Aquamarin an den genannten Fundorten.

Beryll ist schon im Altertum als Edelstein beliebt gewesen und unter diesem Namen auch zum Hindurchsehen verwendet worden; das Wort „Brille“ soll daher kommen.

Euklas ist ein monoklines, ebenfalls Be-haltiges Mineral von der Formel: $H_2O.2BeO.Al_2O_3.2SiO_2$. G = 3,05—3,10. H = 7½. Er ist in Farbe und Durchsichtigkeit dem Aquamarin ähnlich und wird wie dieser geschliffen, muß aber, wegen der vollkommenen Spaltbarkeit nach der Längsfläche sehr vorsichtig behandelt werden. Er begleitet den gelben Topas in Brasilien als große Seltenheit. Auch der Phenakit ist Be-haltig, $2BeO.SiO_2$. Die hexagonalen, und zwar rhomboedrisch-tetartoedrischen Kristalle sind farblos und öfters durchsichtig, so daß sie schöne glänzende Brillanten usw. geben. Das dazu geeignete Material ist aber spärlich und kommt von der Tokowaja im Ural, wo es den Smaragd begleitet und neuerdings etwas reichlicher aus der Goldgrube von San Miguel di Piracicaba in Minas Geräes, Brasilien und nahe dabei im Pegmatit. In diesem in geringer Menge mit Amazonenstein und Topas auch in Colorado und bei Miask im Ilméngebirge (Ural).

6. Topas. Gilt für den Typus der gelben Edelsteine, so sehr, daß auch gelbe Varietäten anderer Mineralien öfters als Topas bezeichnet werden (orientalischer Topas, böhmischer oder spanischer Topas, auch Goldtopas = gelber Quarz, falscher Topas = gelber Flußspat usw.). Nicht immer aber ist der edle Topas gelb, öfters ist er auch farblos oder er gleicht dem Aquamarin so, daß er dann im Edelsteinhandel ebenfalls mit diesem Namen bezeichnet wird. Der Unterschied beider, die übrigens im Wert kaum verschieden sind, liegt im spezifischen Gewicht, das beim Topas fast genau gleich dem des Diamants ist (Gewicht = 3,52). Selten ist die Farbe rot (s. unten). Charakteristisch für den Topas ist auch die vollkommene basische Spaltbarkeit und die starke Reibungs- und Pyroelektrizität. Geschliffen und zwar meist als Brillant oder als Treppenstein werden nur schön durchsichtige und in der Farbe gleichmäßige Exemplare, die dabei einen sehr kräftigen Glanz annehmen. Der Wert ist des reichlichen Vorkommens wegen auch für große und schöne Steine nicht sehr hoch. Häufige Fehler sind Risse nach der Spaltungsfläche (Federn) und wolkige Trübungen (Wolken), die aber, da das Material nicht besonders geschont zu werden braucht, beim Schleifen sich meist entfernen lassen. Fundorte schleifbarer Topase sind ziemlich viele bekannt. In früheren Zeiten berühmt war der Topas vom Schneckenstein bei Auerbach im sächsischen Vogtland, in dem mauerartig aus dem Glimmerschiefer aufragenden Topasfels. In dessen Drusen sitzen die bis über haselnußgroßen, hell- bis dunkelweingelben Kristalle, die die schönen Garnituren im Grünen Gewölbe in Dresden lieferten. Heute wird er kaum mehr benützt. Reich ist Brasilien, und zwar an gelben Kristallen einer- und an farblosen nebst blauen andererseits, beide in ganz verschiedener Weise an verschiedenen Orten vorkommend. Die gelben, bis fingerlang und -dick, finden sich, mit etwas Euklas nur auf Quarzgängen im Tonschiefer in den Hügelzügen südwestlich von Ouro Preto (= Villarica) in Minas Geräes, nie in Seifen. Die Farbe ist heller oder dunkler bis ins Bräunliche und geht durch vorsichtiges Glühen in Rot über (gebrannter Topas, Rosatopas oder brasilianischer Rubin). Selten sind Steine von genau derselben natürlichen Farbe. Die weißen Topase finden sich, begleitet von einzelnen hellblauen, als nicht selten über faustgroße Kristalle auf Drusen in Pegmatitgängen, die Glimmerschiefer und Gneis durchsetzen, im Bezirk Minas Novas im Nordosten des Staates Minas Geräes in Brasilien, sowie als Geschiebe in den dortigen Wasserläufen (Wassertropfen oder pingos d'agoa). Ein solches ist wohl auch der große „Diamant“ Braganza des portugiesischen Kronschatzes. Mitvorkommende Mineralien sind u. a. Aquamarin, Chrysoberyll, Turmalin, Spodumen, Andalusit usw. Im Ural begleitet gleichfalls der Topas den Aquamarin, so in der Nähe von Alabaschka bei Mursinka (bläuliche, bis mehrere Centimeter lange Kristalle) und bei Miask im Ilméngebirge (farblos und gelb). Ebenso ist es im Nertschinsker Kreis in Transbaikalien im Adun-Tschilongebirge und in dessen Fortsetzung, dem Gebirgszug Kuchuserkensk, sowie an der Urulga. Die To-

pase von Adun-Tschilon sind meist von schlechter Beschaffenheit, die von den beiden anderen Gegenden, einander ziemlich gleich, sind die größten, die man kennt (bis 31 Pfund schwer), wasserhell oder intensiv gelb, bis ins Braune, auch bläulich, am Licht sich zum Teil entfärbend. Einiges schleifbare Material kommt auch aus Tasmanien (farblose und hellblaue Gerölle wie in Minas Novas) sowie aus Japan (wasserhelle große Kristalle). Andere Vorkommen sind hier nicht zu erwähnen.

7. **Zirkon.** Von den Varietäten des Zirkon ist schon lange der gelbrote Hyazinth als Edelstein beliebt. Schön braunrote Exemplare gehen unter dem Namen Hyazinthtopas (s. auch Hessonit). Er findet sich in meist nur kleinen Kristallen in den Edelsteinseifen von Ceylon; etwas dunklere kommen neuerdings von Tasmanien und Madagaskar, und bei Anakie in Queensland begleitet Hyazinth die Saphire. Durch Erhitzen wird der Hyazinth entfärbt, auch kann man dadurch die Farbe der tasmanischen heller und schöner machen. Die Steine erhalten durch das Schleifen einen hohen Glanz, besonders die entfärbten, die sogenannten Cerkonier oder Matura-, auch Matara-Diamanten (nach der Stadt Matura oder Matara im südlichen Ceylon). Sie werden zuweilen, namentlich als Rosetten, dem Diamant untergeschoben, sind aber erheblich weicher und schwerer (Gewicht: 4,7). Seit einiger Zeit kommen aus Ceylon auch rosenrote, sowie gelbe, braune und grüne edle Zirkone, letztere von eigentümlich düsterem Aussehen, unter ihrem richtigen Namen in den Handel. Sie sind meist ganz durchsichtig, doch auch nicht selten etwas getrübt, werden aber alle beim Schleifen sehr stark glänzend. Der Wert schöner und größerer Steine ist nicht gering; sie erhalten meist Treppen- oder Tafelform.

8. **Granat.** Als Edelsteine werden verwendet edle, durchsichtige Exemplare von Hessonit, Spessartin, Almandin, Demantoid und Pyrop. Hessonit (Kaneelstein) ist dem Hyazinth in der gelbroten Farbe so ähnlich, daß er meist diesem untergeschoben und unter dessen Namen verkauft wird. Der Unterschied liegt in der einfachen Lichtbrechung und dem geringeren spezifischen Gewicht des Hessonits (Gewicht: 3,6 bis 3,7). Fast alles Material kommt als Geschiebe bis ein Pfund Gewicht aus den Edelsteinseifen von Ceylon. Früher wurden auch die sogenannten „Hyazinthgranaten" von Dissentis (oder vom St. Gotthard) viel geschliffen: sie erfüllen mit anderen Mineralien an der Alpe Lolen im Maigelstal eine schmale Lagerkluft im Glimmergneis. Andere Vorkommen werden wohl kaum benützt. Geschliffen wird der Hessonit mit Facetten (Treppenschnitt usw.) oder en cabochon. Sehr ähnlich in der Farbe ist der edle Spessartin, der u. a. in schönen Exemplaren in den Glimmergruben im Granit von Amelia Court House in Virginien vorkommt und gelegentlich geschliffen wird. Erheblich wichtiger ist der Almandin. Er ist kolumbinrot, dunkelrot mit einem Stich ins Violett. Als Schmuckstein ist er sehr verbreitet und bildet (neben Rubin) einen Teil dessen, was man Karfunkel nannte. Jetzt heißt er manchmal edler Granat schlechtweg. Bräunlichrote Almandine werden von den Juwelieren Vermeille genannt, welcher Name aber auch sonst für ähnliche Sachen verwendet wird. Bei künstlicher Beleuchtung verliert die Farbe aller Almandine sehr und geht stark ins Gelbe. Durch Schleifen wird er lebhaft glänzend, jedoch weniger als Rubin, dem er sich in der Farbe sehr nähern kann. Die häufigste Schlifform ist die Rosette, der Treppenstein usw., auch die mugelige, in diesem Fall werden der tiefen Färbung wegen die Steine unten ausgeschlägelt (Granatschalen). Je klarer und durchsichtiger und je freier von Rissen, desto höher ist der Wert, der aber doch immer ziemlich gering bleibt, besonders bei den ins Bräunliche spielenden Exemplaren. Auch der Almandin ist unter den Edelsteingeschieben von Ceylon in schönen Stücken verbreitet, findet sich aber nicht bei Sirian in Pegu (Rangun in Birma), was häufig behauptet wird und woher er den Namen sirischer (nicht syrischer) Granat erhalten hat. In Menge kommt er aus Ostindien, z. B. von zahlreichen Stellen in Ratschputana, und wird dort auch geschliffen, so in Delhi, Dschaipur usw. Einiges Material liefern die Seifen von Minas Novas in Brasilien, sowie Nordamerika, besonders Grönland. Australien ist in Seifen reich an Almandin, den man früher für Rubin hielt. Europa liefert fast keine schleifbaren Stücke. Pyrop (böhmischer Granat) ist dunkelrot mit einem Stich ins Gelbe (blutrot) und unterscheidet sich dadurch von dem Almandin. Geschliffen wird er meist zu Rosetten, die dann oft dicht gedrängt (en pavé) in Broschen usw. gefaßt werden. In Böhmen liegt der Pyrop in Form kleiner unregelmäßiger, nicht oft über erbsen-, selten über haselnußgroßer Körner sehr reichlich in einem tonigen oder sandigen Kies des Diluviums zwischen dem Südwestfuß des böhmischen Mittelgebirges und dem Egerfluß in dem Gebiet westlich von Trebnitz bis zum Stiefelberg bei Meronitz, sowie bei Neu-Paka unweit Gitschin. Die böhmische Granatschleiferei, besonders wichtig in Turnau, wo aber auch alle anderen Edelsteine verarbeitet werden, ist alt, bekam aber dann

durch das Aufblühen der nordböhmischen Bäder, Karlsbad usw., am Ende des 18. Jahrhunderts einen neuen Aufschwung, so daß zur Zeit der höchsten Blüte 10 000 bis 12 000 Menschen mit dem Aufsuchen, Schleifen und Fassen dieses Granats ihren Lebensunterhalt verdienten. Gegenwärtig ist der Stein nicht in der Mode und ganz aus den Schaufenstern der Juwelierläden verschwunden. Alle böhmischen Granate sind in Beziehung auf Farbe und ideale Reinheit und Fehlerlosigkeit einander gleich und unterscheiden sich nur durch die Größe. Große Steine, schon von 2 bis 3 Karat an, haben wegen ihrer Seltenheit einen erheblichen Wert. Nur von lokaler Bedeutung sind die gleichfalls zum Pyrop gehörigen „Ely-Rubine" von Ely in Schottland, sowie die „Arizona"- und die „Colorado-Rubine" aus den Vereinigten Staaten. Wichtiger ist der sehr schön rote Kaprubin, der die Diamanten im Blaugrund bei Kimberley in Form eckiger Körner neben hellroten Granaten von derselben pyropartigen Zusammensetzung begleitet. Er wird aus den Waschrückständen, den „concentrates", der Diamantwäschereien ausgelesen und vielfach verschliffen. Zum Pyrop gehört endlich noch der um die Jahrhundertwende in Deutsch-Ostafrika im Hinterland von Lindi im Bezirke Luisenfelde in Menge aufgefundene Granat. Er bildet selten über haselnußgroße Körner, ist sehr schön durchsichtig und hat meist einen starken Stich ins Braun oder Gelb, doch kommen auch fast rein karminrote rubinähnliche, sowie kolumbinrote Steine von der Farbe des Almandins vor. Sie werden gegenwärtig, zum Teil unter dem Namen Faschodagranat, vielfach geschliffen und machen wegen ihrer schönen Farbe und ihres starken Glanzes einen ganz angenehmen Eindruck. Zuletzt ist von den edlen Granatarten noch der Demantoid zu erwähnen, der dunkel- oder auch heller gras- bis smaragdgrüne, manchmal auch gelblichgrüne Kalkeisengranat. Er ist bisher fast nur im Syssertsker Bezirk am Westabhang des Urals gefunden worden, und zwar in Form rundlicher bis etwa nußgroßer, von Asbest umgebener Knollen auf Klüften eines Serpentingesteins. Mit Facetten oder rundlich geschliffen gibt er sehr schöne glänzende Steine, die bei dunkler Farbe und vollkommener Durchsichtigkeit recht wertvoll und besonders in ihrer Heimat, in Rußland, geschätzt sind. Nach einem speziellen Fundort heißt er Bobrowkagranat; im Edelsteinhandel geht er aber stets unter dem Namen Olivin, dem er manchmal in der Farbe ähnlich ist. Von diesem sowie von dem ebenfalls oft ähnlichen Smaragd unterscheidet er sich durch die einfache Lichtbrechung.

9. Turmalin. Der edle, durchsichtige Turmalin, der gegenwärtig sehr in der Mode ist, zeigt eine sehr große Farbenmannigfaltigkeit. Von Bedeutung als Edelsteine sind die roten und grünen, sodann die blauen und braunen. Beim Schleifen muß der starke Dichroismus berücksichtigt werden in der Weise, daß bei ganz hellen Steinen die Tafel senkrecht, bei dunkleren parallel zu der Hauptachse angelegt wird. Unter den Schliffformen sind wohl Treppen- und Tafelsteine am häufigsten. Der braune Turmalin, der zuweilen geschliffen wird, findet sich in den Edelsteinseifen von Ceylon; er ist meist ziemlich dunkel, geht aber bis ins Braungelb und Gelb und ist zuweilen grünlichgelb, ähnlich dem Olivin (ceylonesischer Chrysolith oder Peridot). Der rote Turmalin (Rubellit) ist hellrosa bis dunkelrot, vielfach etwas ins Violette gehend. Oefters ist die Farbe der des Rubins so nahe, daß die Steine danach benannt werden. Er findet sich mit Topas, Aquamarin usw. in den Pegmatiten der Gegend von Mursinka bei Katharinenburg im Ural, besonders bei Schaitanka, spärlicher in der Gegend von Nertschinsk (Siberit, sibirischer Rubin). Auch Birma liefert einiges Material (Mainglon, südöstlich von der Rubinenstadt Mogouk), und ebenso Ceylon. Am wichtigsten ist aber wohl Brasilien, wo der rote Turmalin von andersfarbigem, besonders von grünem, auch von blauem, begleitet wird, und zwar in den topasführenden Pegmatiten von Minas Novas. Der rote ist meist nicht so dunkel wie der sibirische, mehr rosa. Der grüne ist ziemlich dunkel, aber schön durchsichtig (brasilianischer Smaragd), ebenso der seltene hell- bis dunkelblaue (brasilianischer Saphir). Seine Farbe nähert sich zuweilen dem Grün und geht ganz in Grün über. Besonders bemerkenswert sind verschiedene Farben an demselben Kristall: roter Kern und grüne Hülle oder (seltener) umgekehrt oder auch rotes und grünes Ende usw. Steine der letzteren Art trifft man gegenwärtig nicht selten geschliffen im Edelsteinhandel. Ganz ähnlich in Färbung und Vorkommen wie in Brasilien findet man den Turmalin an manchen Orten in den Vereinigten Staaten. Längst bekannt ist das Vorkommen im Westen in Maine, besonders am Mount Mica bei Paris Court House, sowie am Mount Apatite bei Auburn. Von ganz besonderer Schönheit sind aber die neueren Funde im Westen, im südlichen Kalifornien, und zwar in den Gebirgen von San Diego und von Riverside County (Mesa Grande, Pala, Ramona usw.). Manche trübe Steine aus dem Mesa Grande-Distrikt zeigen, mugelig geschliffen, den wogenden Lichtschein des Katzenauges (Turmalin-Katzenauge).

Die nordamerikanischen Turmaline werden als einheimisches Produkt fast ganz im Inland verbraucht. Ebenfalls ganz gleich wie in Brasilien ist das seit einiger Zeit bekannte Auftreten von buntem Edelturmalin in Madagaskar, hauptsächlich in den Pegmatiten südlich von Tananarivo (Betafo besonders am Berg Bity, Ambositra, Tremo usw.). Gute Steine sind recht wertvoll, am meisten rote und blaue; am häufigsten sind grüne. Von anderen ähnlich aussehenden Edelsteinen unterscheidet sich der Turmalin außer durch spezifisches Gewicht, Härte und Dichroismus auch durch seine namentlich bei den edlen Varietäten starke Pyroelektrizität, vermöge der die Steine kleine Papierstückchen anziehen.

10. Olivin. Er wird als Edelstein Peridot, manchmal auch Chrysolith genannt. Im Gegensatz zum Turmalin ist er sehr konstant in der Farbe, einem etwas ins Gelbliche gehenden hellen Grün. Geschliffen wird nur der vollkommen reine und klare „edle Chrysolith"; er erhält die gewöhnlichen Formen der farbigen Edelsteine und nimmt beim Schleifen einen kräftigen Glanz an. Im Mittelalter wurde er, namentlich an Kirchengeräten, viel verwendet, und zwar soll das Material dazu von den Kreuzfahrern aus dem Orient mitgebracht worden sein. Manche sogenannte Smaragde an solchen Geräten sind Olivine, wie z. B. die an dem Schrein, der die Reliquien der drei Weisen im Kölner Dom birgt. Später gingen die Fundorte anscheinend gänzlich verloren, bis um die Jahrhundertwende das immer schon in Aegypten vermutete Vorkommen wieder aufgefunden wurde. Es liegt auf der Insel Seberget (Zebirget oder St. Jean) im Roten Meer nahe der Küste unter 23°36′ n. Br., wo prächtige, klare bis walnußgroße Kristalle Drusen im Serpentin bilden. Andere Fundorte kommen kaum in Betracht. Als Edelstein wird vornehmlich der entsprechend gefärbte Chrysoberyll Chrysolith, der Demantoid dagegen Olivin genannt; die Unterschiede ergeben sich von selbst aus den mineralogischen Eigenschaften.

Aehnlich in den Farben ist der M o l d a v i t (Bouteillenstein, Pseudochrysolith, auch Wasserchrysolith). Er ist stets etwas düstergrün in nie sehr dunkeln Nuancen, die zuweilen ins Braune gehen. Es ist ein natürliches, durchsichtiges, dem Bouteillenglas ähnliches Glas, das in Form etwa nußgroßer Stücke mit eigentümlich narbiger Oberfläche zwischen Moldauthein und Budweis in Böhmen, sowie in der Nähe von Trebnitz und an anderen Orten in Mähren im Erdboden und im Flußkies gefunden wird. An seiner Stelle wird nicht selten ein ähnlich gefärbtes künstliches Glas benutzt, das die Steinschleifer Obsidian nennen. Aber auch der echte O b s i d i a n in rein schwarzen einschlußfreien Stücken, von Lipari, Island, Mexiko usw., wird zuweilen geschliffen und für Trauerschmuck benützt.

11. Opal. Findet in verschiedenen Varietäten als Edelstein vielfache Verwendung. E d e l o p a l (Element- oder Firmamentgestein), stets trübe, milchweiß, rötlich- und gelblichweiß bis braun, durchscheinend, zuweilen schwarz, mit einem bunten Farbenspiel, hervorgebracht durch ein mehr oder weniger lebhaftes Irisieren auf feinen, die Substanz durchziehenden Rissen, die beim Eintrocknen der ursprünglichen Kieselgallerte entstanden sind. Diese oft sehr lebhaften und kräftigen Farben, blau, grün, sowie rot und gelb, erstrecken sich bald über größere Flächen eines Steins ziemlich gleichmäßig und einheitlich, und wo verschiedene Farben auftreten, gehen sie ganz allmählich ineinander über (meist in Australien); oder kleine Flitterchen und Fleckchen von verschiedener Farbe wechseln häufig und rasch mit scharfen Grenzen, so daß ein kaleidoskopartig grelles buntes Bild erscheint (Harlequin- oder Flimmeropal, häufig in Ungarn). Nach den speziellen Verhältnissen des Farbenspiels werden verschiedene Abarten mit Namen unterschieden und je nach der durch lebhafte Farben und bunte Abwechselung bedingten Schönheit ist der Wert verschieden, der recht hoch steigen kann. Beim Schleifen wird der Glanz nie sehr kräftig; die Steine erhalten meist eine mugelige, zuweilen auch eine facettierte Form, besonders die des Brillants, durch die dann bis zu einem gewissen Grade das Farbenspiel des Diamants vorgetäuscht wird. Am längsten ist wohl der ungarische Edelopal bekannt, der seit Jahrhunderten bei Cerwenitza im Kaschau-Eperieser Gebirge in ausgedehnten, zum größten Teil unterirdischen Gräbereien gewonnen wurde. Jetzt ist das Vorkommen ziemlich erschöpft. Er erfüllt, zusammen mit gemeinem Opal, Spalten und andere Hohlräume eines verwitterten Pyroxenandesits oder eines dazu gehörigen Tuffes. Manchmal sind zahlreiche ganz kleine farbenspielende Opalpartikelchen in dem grauen oder braunen Gestein eingeschlossen, das dann als Ganzes geschliffen wird (Opalmutter). Der ungarische Edelopal kam früher zum Teil über Konstantinopel in den Handel, daher und vielleicht auch wegen seiner besonderen Schönheit die Bezeichnung „orientalischer Opal". Ganz ähnlich in vulkanischem Gestein trifft man den edlen Opal reichlich in Honduras (bei Garcias usw.), in Guatemala, in Mexiko (Esperanza-Gruben bei San Juan del Rio im Staat Queretaro usw.) und zum Teil auch in den Vereinigten Staaten. Am meisten Edelopal liefert zurzeit A u s t r a l i e n, und zwar Neu-Süd-Wales und Queensland. In Neu-Süd-Wales findet

er sich in einem hellen, harten Sandstein der Kreideformation als Bindemittel, aber auch auf Klüften, nicht selten in verkieseltem Holz, sowie als Versteinerungsmittel von Schnecken und Knochen. Die Steine von hier zeigen häufig breite, gleichmäßig gefärbte Flächen, stehen aber zum Teil hinter den guten ungarischen und den nicht selten ebenso schönen mexikanischen usw. nicht zurück. Im westlichen und südwestlichen Queensland enthält ein brauner Sandstein oder harter Ton desselben Alters auf Klüften und Hohlräumen Opal, der gleichfalls über größere Flächen ziemlich einheitlich, besonders blaue und grüne Farbe zu zeigen pflegt. Die Opalfelder beider Kolonien stehen in unmittelbarem Zusammenhang und werden in zahlreichen Gruben ausgebeutet. Auch hier wird das Muttergestein mit kleinen Opalteilchen geschliffen (Opalin). In letzter Zeit ist von einem noch nicht näher bekannten neuen australischen Fundort schöner schwarzer Opal in den Handel gebracht worden. Erwähnenswert sind vielleicht noch die undurchsichtigen grauen und braunen Opale mit schönem Farbenspiel aus Japan. Feueropal (Sonnenopal). Schön feuerrot, vielfach ins Gelb und Braun gehend, auch braun und gelb bis farblos; selten bläulich bis blau, zuweilen farbenspielend wie der Edelopal, stark durchscheinend bis nahezu aber nie ganz durchsichtig, gibt en cabochon oder facettiert geschliffen einen ziemlich stark glänzenden, hübschen Schmuckstein, der aber im Handel wenig vorkommt. Die Farbe verschlechtert sich leider öfters leicht in Berührung mit Licht und Luft und besonders mit Wasser. Der Feueropal findet sich in einiger Menge, die Stücke von einer fast weißen trüben Verwitterungsrinde umgeben, bei Zimapan, Staat Hidalgo, in Mexiko, von wo ihn zuerst A. v. Humboldt nach Europa brachte. Spärlich begleitet er den Edelopal von Queretaro, von wo auch die bläulichen und blauen Stücke kommen. In neuerer Zeit kommen schöne Steine zusammen mit gleichfalls recht schönem Edelopal von Simav, Vilajet Brussa in Lydien (Kleinasien), wo sie in einem Liparit liegen.

Von den anderen Opalsorten sind hier im Vorbeigehen folgende zu erwähnen, die alle im Edelsteinhandel wenig Bedeutung haben: Hyalit (Glasopal) gibt lebhaft glänzende durchsichtige Steine. Prasopal, apfelgrün von der Farbe des Chrysoprases, den er bei Frankenstein in Schlesien begleitet. Milchopal, gemeiner Opal, Halbopal, Jaspopal usw. Die aus dem Basaltgebiete von Steinheim bei Hanau, vom Quegstein und von Oberkassel im Siebengebirge, bei Telkibanya in Ungarn, von den Faröern, von Island usw. werden bei hübscher Farbe zuweilen geschliffen. Dasselbe geschieht manchmal mit dem Holzopal, und mit dem Menilit der Gegend von Paris mit seiner hübschen graubraunen Farbe. Hydrophan wird zuweilen als doppelter Cabochon à jour in Nadeln usw. gefaßt, aber mehr als Merkwürdigkeit, um das Klarwerden im Wasser zu zeigen, besonders wenn dabei zugleich das Farbenspiel des Edelopals auftritt (Weltauge). Wenig wichtig ist auch der Kascholong in dünnen Lagen mit Chalcedon abwechselnd und daher perlmutterglänzend (Perlmutteropal oder -achat). Milchweiß, zuweilen ins Gelbliche oder Rötliche gehend, trübe. Früher wurde er viel verwendet. Er sollte aus dem Lande der Kalmükken stammen (Kalmückenopal oder -achat), findet sich auch in Kärnten auf dem Brauneisenstein von Hüttenberg, auf den Faröern, in Island usw., ist aber doch immerhin eine Seltenheit und daher nicht ohne Wert. Neuerlich kommt von Yarra Yarra in Westaustralien das Opalkatzenauge, trüber, brauner, gelber oder grüner Opal, der von braunen, goldigschillernden oder grünen Krokydolithschnüren durchwachsen ist (Krokydolithopal) und dadurch dem Tigerauge ähnlich wird.

Mit dem Opal sind wir in die Reihe der nicht mehr ganz durchsichtigen Edelsteine eingetreten. Es schließt sich hier nun an der vollkommen undurchsichtige Türkis.

12. Türkis. Er ist grün oder blau, aber nur die blaue Farbe ist in Europa geschätzt, der Orientale verschmäht aber auch die grüne nicht und jeder Araber trägt einen kleinen Stein, eventuell billig in Zinn gefaßt, am Finger, der ihm als glückbringend gilt. Am beliebtesten ist ein reines tiefes Himmelblau, das bei Lampenlicht seine Schönheit behält. Steine dieser Art, besonders etwas größere, schon von Bohnengröße an, sind sehr wertvoll, blaß himmelblaue sind es viel weniger. Vom reinen Blau führen alle möglichen Uebergänge zum reinen Grün und damit sinkt der Wert auf Null. Bei manchen Steinen (z. B. vom Sinai und von Nordamerika) geht die blaue Farbe allmählich in die grüne oder weiße über, wodurch ursprünglich kostbare Steine ganz entwertet werden können. Die Schliffform ist stets en cabochon. Sehr alt sind die Gräbereien westlich von Meschhed im Bezirk Mischapur der Provinz Chorassan in Persien, wo sich das Mineral auf kleinen Spalten und Hohlräumen eines verwitterten porphyrischen Trachyts und einer aus Brocken desselben mit eisenschüssigem Bindemittel bestehenden Breccie, sowie lose im Boden in dem daraus entstandenen Verwitterungsgrus findet. Das ganze Gestein zeigt blaue und grüne Adern und Flecken, aber schon haselnußgroße reine Partien sind selten. Die Gruben sind sehr ausgedehnt und zahlreiche Arbeiter sind darin tätig. Hier sind die wichtigsten Fundorte für diesen Edelstein und der persische Türkis ist um so geschätzter, da er seine blaue Farbe nicht verliert. Schon von den alten Aegyptern ausgebeutet wurden die Gruben am

Nordabhang des Wadi Meghara auf der Sinai-Halbinsel im Gebiet des Serbal, nahe der Westküste. Die Türkise liegen in dem roten nubischen Sandstein. Die alten Gruben wurden in neuerer Zeit wieder aufgetan, kamen aber rasch wieder zum Erliegen, u. a. auch deswegen, weil der anfänglich schöne blaue Stein vielfach nach kurzer Zeit unansehnlich, farblos oder grün wurde. Uebrigens findet man auch sonst in jener Gegend Türkis, der von den Umwohnern gelegentlich gesammelt und verkauft wird. Wichtig ist das Vorkommen in den Vereinigten Staaten, besonders in Neu-Mexiko, aber auch in Colorado, Nevada, Arizona und Kalifornien. Es sind dort mehrere Türkis führende Horizonte, in denen schon die alten Mexikaner in vorhistorischen Zeiten den „Calchihuitl“ genannten Stein gegraben haben, und nach ihnen die spanischen Eroberer. Die alten verlassenen Gruben sind später wieder aufgefunden und zum Teil wieder in Betrieb gesetzt worden. Die Qualität ist im allgemeinen gering, doch auch öfters der der persischen Türkise gleich, man findet aber mehr größere Steine als dort. Ungünstig ist, daß bei vielen die Farbe abblaßt und häßlich wird. Das Muttergestein ist auch hier ein trachytisches, das vielfach mit den darin eingewachsenen Türkispartikelchen zusammen geschliffen wird (Türkismutter). Die nordamerikanischen Türkisgruben sind jetzt die ertragreichsten der Welt; 1907 sind 600 Pfund ausgewählte rohe Türkise und 3000 Pfund Türkismutter gewonnen worden. Der Türkis ist der erste Edelstein, dessen künstliche Nachbildung mit allen Eigenschaften des natürlichen gelungen ist; solche künstliche Türkise sollen nicht wenige im Handel sein, eine Unterscheidung von echten ist bei geschliffenen Steinen kaum möglich.

Aehnlich dem echten Türkis (Türkis vom alten Stein) ist der Zahntürkis (Beintürkis, Türkis vom neuen Stein). Es sind Knochen und besonders Zähne vom Mammut, Mastodon, Dinotherium und anderen meist vorweltlichen Tieren, die in der Erde durch Eisenphosphat blau, durch Kupfersalze auch wohl grün gefärbt wurden. Die blauen werden wie die echten Türkise mugelig geschliffen, sie unterscheiden sich aber von den letzteren durch die manchmal schon mit der Lupe erkennbare Struktur, durch das Aufbrausen mit Salzsäure und den Geruch beim Erhitzen. Bei künstlicher Beleuchtung ist die Farbe unansehnlich grau. Der Wert ist gering. Fundorte liegen unter anderem bei Simorre, Departement du Gers, in Frankreich. Dem echten Türkis in der Zusammensetzung ähnlich sind: der apfelgrüne Variscit, der zuweilen geschliffen wird, besonders eine Abart, die im Staate Utah im Quarz eingewachsen vorkommt (Utahlit) und der diesen begleitende, ganz ähnlich aussehende Wardit. Beide werden zuweilen auch unter dem Namen Amatrix mit ihrem Muttergestein zusammen verarbeitet. Ferner der Kallainit (Kallais), von dem rundliche Stückchen von grüner Farbe, bisher ausschließlich in einem keltischen Grabe in der Bretagne gefunden worden sind, anscheinend ein prähistorischer Schmuckstein. Endlich der Lazulith, blau, als sogenannter Blauspat im Quarz eingewachsen im Salzburgischen. Sie alle spielen aber als Schmucksachen eine sehr untergeordnete Rolle.

13. **Cordierit, Vesuvian u. a.** Ebenfalls sehr beschränkt ist die Bedeutung der folgenden Mineralien. Cordierit (Luchssaphir, Wassersaphir). Aus den durchsichtigen Geschieben von Ceylon werden zuweilen Würfel hergestellt, deren Flächen auf den Kristallachsen senkrecht stehen; mit einer Ecke auf einer Nadel befestigt zeigen sie dann den dem Laien merkwürdigen Pleochroismus. Kommt neuerdings in einiger Menge aus Madagaskar. Vesuvian (Idokras). Geschliffen werden zuweilen in Neapel die durchsichtigen braunen Kristalle vom Vesuv und in Turin die grünen von der Mussaalp im Alatal (Piemont); beide werden besonders in Italien als einheimische Edelsteine getragen. Einen dichten grünen Vesuvian mit splitterigem Bruch fand man am Piz Longhin im Bergell, dann in Tirol und hielt ihn anfangs für Jadeit; später wurde er auch in Kalifornien entdeckt (Kalifornit); zuweilen wird daraus ein Stein mugelig geschliffen. Axinit. Die durchsichtigen Kristalle vom Dauphiné, von Cornwall usw. geben mit Facetten geschliffen, kräftig glänzende Schmucksteine; es ist einer der wenigen braunen Edelsteine, unter denen er durch seinen starken Dichroismus gekennzeichnet ist. Auch der farblose klare Datolith und der meist trübe, blaue Cyanit (Disthen) werden zuweilen, letzterer unter dem Namen Sapparé geschliffen. Andalusit kommt zurzeit in ziemlicher Menge aus Minas Novas; er ist durchsichtig, und stark pleochroitisch, und zeigt nach verschiedenen Richtungen betrachtet, rote und grüne Farbe. Die Varietät des Chiastolith mit seinem schwarzen Kreuz auf dem trüben farblosen Querschnitt dient als Amulett; solche werden auch zuweilen unter dem Namen „Stealith“ als Schmuck getragen. Schöne Steine, grün, nach anderer Richtung braun, gibt der stark pleochroitische Epidot, besonders die durchsichtigen Kristalle von der Knappenwand. Prächtig dunkel smaragdgrün, aber nicht sehr klar durchsichtig ist der Dioptas (Kupfersmaragd) von der Kirgisensteppe, neuerdings auch in größeren Kristallen aus Französisch-Kongo. Chemisch nahe steht das trübe amorphe Kieselkupfer (Chrysokoll, Kupfergrün, Kieselmalachit) aus manchen Kupfererzlagerstätten, besonders von Nischne Tagil im Ural, sowie das „Kupferblau“ von dort und von Phönixville in Arizona, das zuweilen dem Türkis untergeschoben wird. Lichtapfelgrün und gleichfalls amorph und trübe ist der Garnierit, ein wasserhaltiges Nickelsilikat von Neukaledonien. Hübsche hellgrün durchsichtige Steine gibt der Titanit in seiner Varietät als Sphen. Ein Titanosilikat von Barium ist der schön blaue stark pleochroitische Benitoit (Himmelstein), der vor kurzem in Benito County in Kalifornien aufgefunden wurde. Er gibt manchen Saphiren recht ähnliche starkglänzende Steine, ist aber weicher und leichter (H. $= 6^1/_2 - 6^1/_2$; G. $=$ 3,64—3,65). Der Fundort scheint übrigens bereits

erschöpft zu sein. Gelblichgrün und wohl immer etwas trübe ist der Prehnit, dessen faserige Varietät manchmal einen hübschen Stein liefert. Zu ihm gehört wohl auch der Chlorastrolith, kleine licht bläulichgrüne Kugeln, die wegen ihrer Faserigkeit zuweilen die Lichterscheinungen des Katzenauges zeigen; sie finden sich, ausgewittert aus einem Mandelstein, am Strande einiger Inseln im Oberen See und werden in den Vereinigten Staaten als einheimisches Produkt zuweilen getragen. Ebenso ist es mit dem im Aussehen und Vorkommen ähnlichen Zonochlorit mit abwechselnd hell- und dunkelgrünen Lagen, und dem Lintonit, der aus grünen und fleischroten Schichten besteht. Schließlich seien noch zwei zinkhaltige Mineralien erwähnt: Kieselzinkerz (Kieselgalmey), bildet zuweilen radialfaserige und konzentrische schalige Aggregate von grüner und blauer Farbe in den Erzlagerstätten von Laurion in Attika, Santander in Spanien, Nertschinsk in Transbaikalien usw., die mugelig geschliffen ganz hübsche trübe Steine liefern. Ganz ähnlich verhält sich der Zinkspat (Galmey) von Laurion usw.; eine schön apfelgrüne Varietät aus Neu-Mexiko ist „Bonamit" genannt worden, eine goldgelbe aus Arkansas geht unter dem Namen „Turkeyfat".

Damit sind wir schon weit in das Gebiet der Halbedelsteine hineingekommen, deren wichtigste wir nun eingehender zu betrachten haben.

14. Feldspatgruppe. Mehrere ihrer Glieder finden als Schmucksteine Verwendung, Orthoklas sowohl wie Plagioklas. Mondstein (Wasseropal oder Fischauge, auch Girasol) ist ein stark durchscheinender Orthoklas (Adular), der auf der Querfläche k (100) und auch auf der hinteren Schiefendfläche y (201) einen weißen bis bläulichen wogenden Lichtschein, ähnlich dem des Katzenauges (Chatoyieren), zeigt. Man hat ihn mit dem Licht des Mondes verglichen. Besonders schön tritt er hervor, wenn der Stein über der Querfläche eben oder flach rundlich geschliffen ist; er wandert dann bei der Drehung des Steins über dessen Oberfläche hin. Kugeln aus Mondstein ahmen die Wirkung der Perlen nach. Verursacht wird er durch zahlreiche in jenen beiden Richtungen eingelagerte miskrokopisch kleine farblose, lebhaft glänzende Kristallplättchen von nicht genauer bekannter Natur; fehlen sie, so fehlt auch der Lichtschein und umgekehrt. Manche alpine Adulare zeigen ihn sehr schön, am verbreitetsten und vollkommensten ist er aber an den Stücken von Ceylon, die in der Umgegend von Nuwara Elliya usw. einen Gemengsteil eines stark zersetzten Pegmatits bilden. Der Mondstein ist der einzige Edelstein in Ceylon, den man auf seiner ursprünglichen Lagerstätte findet und gewinnt, doch fehlt er auch als Geschiebe in den Seifen nicht. Aus diesen war er schon im Altertum bekannt. Gegenwärtig ist er in der Mode und sehr beliebt. Andere Fundorte in Brasilien, Nordamerika usw. haben keine Bedeutung, doch kommt am Mineral Hill bei Media, Delaware Co., Pennsylvanien ein Albitmondstein mit ganz gleichen Eigenschaften vor, der jedoch kaum im Handel anzutreffen ist. Der labradorisierende Feldspat aus den Syeniten von Larvik und Fredriksvärn im südlichen Norwegen wird kaum als Schmuckstein benützt, wichtig ist dagegen der Labradorit (Labradorfeldspat), der, aber nur an wenigen Orten, auf seiner unansehnlichen grauen Körperfarbe das prächtige Farbenspiel zeigt, das ihn auszeichnet. Die Farben sind lebhaft metallisch schillernd, meist blau und grün, auch wohl rot und gelb in verschiedenen Nuancen, entweder eine Farbe vorherrschend, oder mehrere zu einem lebhaft bunten Bilde vereinigt, zuweilen eigentümliche Figuren bildend. Die Erscheinung, das Labradorisieren oder die Farbenwandlung, zeigt sich nur bei einer ganz bestimmten Lage des Steins gegen das Auge, beim Drehen verschwindet sie, daher der Juweliernamen „Changeant". Die Hauptschillerfläche ist die Längsfläche M (010), eine andere entspricht o (1̄11). Die Entstehung dieser brennenden Farben ist wohl noch nicht ganz genügend aufgeklärt, doch beruhen sie auch hier wenigstens zum Teil auf der Anwesenheit kleiner metallisch glänzender, in gewissen Richtungen eingewachsener Plättchen (vgl. den Artikel „Farbe"). Die Wertschätzung ist eine um so höhere, je glänzender, leuchtender und bunter die Farben sind, die am besten auf einer ebenen Schlifffläche in der Richtung der Hauptschillerfläche oder auf einer sich ganz schwach schildförmig darüber erhebenden hervortreten. Zuerst, und zwar Ende des 18. Jahrhunderts, wurde farbenspielender Labradorit von den Herrnhuter Missionaren an der Labradorküste bei Nain, besonders auf der kleinen St. Pauls-Insel entdeckt, wo er mit dem metallisch schillernden Hypersthen (s. unten) einen sehr grobkörnigen Norit bildet. Später folgten Funde in der Gegend von St. Petersburg (Peterhof usw.), in Finnland (Ojamo und Miolo) und Volhynien (Kiew), sowie in Queensland (bei Brisbane) und in den Vereinigten Staaten (mehrorts im Staate New York, New Jersey usw.). Das schönste und und reichste Vorkommen ist wohl das bei Nain. Schöne Steine, zu Manschettenknöpfen usw., sind nicht ganz billig, doch werden aus Labradorit auch Stockknöpfe, Dosen und ähnliche Sachen der Kunstindustrie hergestellt. Amazonenstein ist ein stets hellgrüner, zuweilen etwas ins Bläuliche gehender Mikroklin, der zuerst am Amazonenstrom gefunden worden sein soll. Jetzt kommt er aus der Gegend von Miask im Ilméngebirge (Ural), noch schöner vom Pikes Peak in Colorado, und von Florissant usw.

ebendort, sowie von Amelia Court House in Virginien und von anderen Orten in den Vereinigten Staaten, sowie von Madagaskar, überall im Pegmatit. Tief und gleichmäßig gefärbte Steine mit ebener oder ganz schwach gewölbter Schlifffläche haben immerhin einen gewissen, wenn gleich beschränkten Wert. Sonnenstein (Avanturinfeldspat) ist ein hellgefärbter Feldspat, mit zahlreichen winzigen parallel mit der Basis P (001) eingewachsenen roten, metallisch glänzenden Eisenglanzplättchen, die dadurch auf ebenen oder flach schildförmigen Schliffflächen in der Richtung von P einen hübschen Schiller zeigen. Am verbreitetsten und wohl auch am schönsten ist der zum Oligoklas gehörige Sonnenstein von Tvedestrand im südlichen Norwegen; andere Fundorte sind auf der Sattelinsel im Weißen Meer bei Archangel und bei Werchne Udinsk an der Selenga, einem Nebenfluß des Baikalsees. Orthoklassonnenstein (Avanturinorthoklas), mehrorts in den Vereinigten Staaten, ist nicht wichtig.

Im Anschluß an den Feldspat sei erwähnt der Elaeolith, besonders der grüne vom südlichen Norwegen usw., der en cabochon geschliffen zuweilen einen hübschen wogenden Lichtschein zeigt und der Cancrinit von Litchfield, der wegen seiner hübschen gelben Farbe zuweilen verwendet wird, ebenso auch andere Farbenvarietäten von anderen Orten, rosa, grün usw.

15. Lapis lazuli. Wichtig ist der Lapis lazuli (Lasurstein), der wegen seiner prächtigen, oft tief blauen Farbe, trotz seiner Undurchsichtigkeit und geringen Härte (Härte = 5½) viel als Schmuckstein, aber auch häufig zu kleinen Gebrauchsgegenständen, Schalen, Vasen usw. verwendet wird; die seltene, grüne und violette Abart ist nicht geschätzt. Es ist überall ein Kontaktprodukt im Kalkstein in Berührung mit einem Tiefengestein, Granit usw. Dieser Kalkstein enthält dann zahlreiche, dicht gedrängt liegende blaue Mineralkörner, die ihn, wenn schon nicht immer ganz einheitlich und gleichmäßig, färben, so daß weiße Streifen ohne diese Körner hindurchziehen. Die blauen Körner gehören entweder zu dem Mineral Hauyn (s. unten) oder zu dem Ultramarin genannten Mineral von der Zusammensetzung: $3(Na_2O.Al_2O_3.2SiO_2) + 2Na_2S_2$ in wechselndem Mengenverhältnis. Rein- und dunkelblaue Stücke geben rundlich oder eben geschliffen schöne Steine von erheblichem Wert. Die Fundorte sind zum Teil nur unvollständig bekannt; die wichtigsten liegen in Asien. Schon von Marco Polo besucht (1271) wurden die Gruben in Badakschan am Oberlauf des in den Oxus (Amu Darya) mündenden Koktschaflusses am Nordabhang des Hindukusch und nahe den dortigen Rubingruben. Von hier stammt viel schönes tiefblaues Material, oft mit kleinen gelben Schwefelkieskriställchen. Solche Stücke dienen dann manchmal in Mosaiken zur Herstellung des gestirnten Himmels. Ein zweites asiatisches Gebiet von Lasursteingruben liegt in der Gegend von Kultuk am Westende des Baikalsees, an der Slüdjanka und Talaja, die in diesen, und an der Malaja Bistraja, die in den Irkut, einen Nebenfluß der Angara, münden. Das Vorkommen in den chilenischen Anden (Kordilleren von Ovalle) ist ohne Bedeutung (von hier der grüne Lasurstein), ebenso alle übrigen. Künstlich wird der Lasurstein nachgeahmt mittels des hellgrauen Jaspis von Nunkirchen im Kreis Merzig. Dieser ist porös und imprägniert sich leicht mit einem Eisensalz und dann mit Ferrocyankalium. Es scheidet sich dann im Innern des Steins Berliner Blau aus, das ihn intensiv blau färbt, wenn auch düsterer als der echte (deutscher oder falscher Lapis).

Zuweilen wird auch der blaue Hauyn und der blaue Sodalith geschliffen; Proben von letzterem wurden in der alten Trümmerstätte von Tiahuanaco in der Nähe des Titicacasee gefunden.

16. Pyroxen und Amphibol. Selten sieht man Hypersthen, den Begleiter des farbenspielenden Labradorits von der Labradorküste, über der Schillerfläche flach mugelig geschliffen und dann mit düsterem kupferigem, metallischem Schiller auf dunklem Hintergrund, und ebenso den zuweilen kräftig metallisch schillernden Bronzit und den Diallag, sowie den Schillerspat von der Baste bei Harzburg, bei dem aber nur einzelne schillernde Partien in dem dunkeln Serpentin eingeschlossen sind. Bouteillengrün und durchsichtig ist der Diopsid, der zuweilen in den gewöhnlichen Formen stark gefärbter Steine geschliffen wird; in Frage kommen hierbei das Vorkommen von der Mussaalp im Alatal in Piemont mit Hessonit, das schönere von der Alp Schwarzenstein im Zillertal in Tirol und einige andere Fundorte. Eine gewisse Bedeutung hat der Spodumen mit zwei verschieden gefärbten durchsichtigen Varietäten. Der seltene Hiddenit (Lithionsmaragd) ist prächtig smaragdgrün bis grünlichgelb in den Pegmatitgängen von Stony Point, Alexander County, Nordkarolina, sowie von Madagaskar, und gelb, in derselben Weise vorkommend in Brasilien. Er heißt in Idar Chrysolith; von diesem, dem Olivin unterscheidet er sich durch niederes spezifisches Gewicht und deutlichen Pleochroismus, vom Smaragd durch größere Dichte. Kunzit ist ein mehr oder weniger ausgesprochen violetter bis farbloser Spodumen und gleicht sehr dem Amethyst (Lithionamethyst),

wird aber beim Schleifen glänzender und ist schwerer und merklich pleochroitisch. Er findet sich fast ausschließlich wie der Turmalin in den Pegmatitgängen von San Diego und in Riverside County im südlichen Kalifornien, fehlt aber im Mesa Grande-Distrikt. Neuerer Zeit kommt er auch aus Madagaskar. Kaum als Schmuckstein findet man den rosenroten Rhodonit aus dem Ural, der mehr zu Objekten der Kunstindustrie verwendet wird.

Nephrit. Jadeit. Diese hatten in der Vorzeit größere Bedeutung als jetzt, wo sie nur noch in China als Stein Yü in weiterem Umfang zu Schmucksachen für Männer und Frauen und zu kleinen Gebrauchsgegenständen aller Art verwendet werden. Es sind gewissermaßen Edelsteine der Vorzeit, die man in alten Gräbern, Pfahlbauten usw. zu Schmuckstücken, Hämmern, Meißeln und anderen derartigen Geräten verarbeitet auch in Europa vielfach findet. Da man früher hier kein Rohmaterial einheimischen Ursprungs kannte, so hatte sich nach H. Fischer die Ansicht gebildet, daß die Alten ihren Nephrit und Jadeit aus den fernen Fundorten in Asien, Neuseeland usw. geholt hätten. Man hat aber beobachtet, daß die in Europa im verarbeiteten Zustand angetroffenen Nephrite und Jadeite sich unter dem Mikroskop in mancher Hinsicht eigenartig verhalten und von jenen Vorkommnissen verschieden sind, und es wurde dann auch Rohmaterial in Europa entdeckt, so daß jene Ansicht von H. Fischer nach langer, eingehender und zum Teil erregter Diskussion der „Nephritfrage" nun allgemein verlassen ist.

Nephrit ist verworrenfaserig dichter Strahlstein mit splitterigem Bruch. Er hat durch diese Struktur eine ganz enorme Zähigheit erlangt und ist höchstens kantendurchscheinend. Die Farbe ist ein mehr oder weniger ausgesprochenes düsteres Grün, ziemlich dunkel bis zum Grauen und Farblosen. Schön und gleichmäßig gefärbte Stücke werden nicht nur in China, sondern auch, wenn schon selten, bei uns zum Schmuck, als Ringstein usw. benützt, der Schliff, meist en cabochon, gibt aber keinen sehr kräftigen, etwas fettigen Glanz. Altbekannte Fundorte sind in Neuseeland auf der Westseite der Südinsel, anstehend mit Serpentin und besonders als Geschiebe in den Flüssen. Die Eingeborenen verwenden das schöne Material unter dem Namen Punamu seit Jahrhunderten zu Streitkolben, Schmucksachen, Idolen usw. Wichtig sind auch die Fundorte in Asien, besonders für die chinesische Industrie. Sie liegen in Ostturkestan, im Osten des Pamirplateaus, vom Raskem Darja bis weit nach Osten, sowie in der Gegend westlich vom Baikalsee in dem Felsengebirge Batugol nahe den früheren Alibert-Graphitgruben, überall anstehend, besonders als Einlagerung in den kristallinischen Schiefern und als Gerölle in den Wasserläufen. Auch auf der Tschuktschen-Halbinsel kommt er vor. Nur wissenschaftliches Interesse haben die Funde von Rohnephrit in Amerika (Alaska) und Europa (Geschiebe im nordischen Diluvium, Schlesien, Alpen in Steiermark und der Schweiz, Harz). Vielfach werden dem Nephrit andere Sachen untergeschoben (Falsonephrite), Mineralien, auch Glas (pâte de riz). Härte und spezifisches Gewicht geben den Unterschied.

Jadeit gehört zur Pyroxengruppe. Es ist ein verworrenfaseriges Aggregat, dem die chemische Formel: $Na_2O.Al_2O_3.4SiO_2$ zukommt. Eine eisenhaltige und daher ganz dunkelgrüne Varietät ist der Chloromelanit. Der eigentliche Jadeit ist durchscheinend, farblos bis mehr oder weniger intensiv grün, teils graulichgrün, teils prächtig smaragdgrün. Namentlich diese letztere Varietät, die in meist nicht sehr umfangreichen Partien dem farblosen eingewachsen ist, werden in Europa mugelig geschliffen zum Schmuck verwendet, in China ist auch der andersgefärbte Jadeit sehr geschätzt. Der Hauptfundort ist in Oberbirma in einem großen Steinbruch bei Tammaw. Als Geschiebe wird er in derselben Gegend aus dem Urufluß usw. gewonnen. Von Birma stammen die seltenen smaragdgrünen Stücke und fast alles Rohmaterial der Chinesen. Er begleitet auch den Nephrit in Zentralasien, viel Material kommt aus „Tibet". Geringe Mengen liefern die Schweizer und piemontesischen Alpen. Der Jadeit kann dem Nephrit sehr ähnlich werden, er ist aber schwerer (Gewicht = 3,3 statt 3,0). und schmilzt schon in der Kerzenflamme mit sehr starker Natriumreaktion. Dadurch unterscheidet er sich auch von Falsifikaten (vgl. den Artikel „Nephrit").

17. **Quarzmineralien.** Diese liefern eine große Menge wichtiger und schöner Schmucksteine, die Hauptmasse der Halbedelsteine. Sie sind im rohen Zustand zum Teil als mehr oder weniger deutlich erkennbare und regelmäßig begrenzte Kristalle ausgebildet, zum Teil bilden sie körnig oder auch faserig dichte Aggregate, welche letzteren man unter dem Namen Chalcedon zusammenfassen kann. Wir werden die Quarzmineralien, soweit sie hier in Frage kommen, in diesen drei Abteilungen betrachten.

a) Kristallisierter Quarz. — Bergkristall. Er findet hauptsächlich Anwendung zu „Brillengläsern", feinen Gewichten, Siegelstöcken und -steinen und anderen ähnlichen kleinen Gebrauchsgegenständen, als eigentlicher Schmuckstein wird er aber,

wenigstens unter seinem rechten Namen, wenig gebraucht, eher, in derselben Weise geschliffen wie diese, zur Nachahmung besserer farbloser und durchsichtiger Steine, wie besonders des Diamants (Similidiamant usw.). Die Bergkristalle gewisser Fundorte werden auch gelegentlich als Diamanten bezeichnet, so die Schaumburger und Marmaroscher Diamanten, die Diamanten von Briançon usw. Von dem echten Diamant unterscheidet sich der Bergkristall durch geringere Härte und geringeres spezifisches Gewicht; er zeigt nicht den schönen und kräftigen Diamantglanz und das Farbenspiel, und sieht daher, wenn schon als Brillant geschliffen, kalt und tot aus. Das Farbenspiel wird manchmal durch Bestreichen der Hinterseite mit bunten Farben nachgeahmt (Iris). Benutzt werden hauptsächlich die Bergkristalle aus den Alpen. Von hier gelangen sie nicht selten durch die Flüsse (die Aar) in den Rhein, in Form runder Gerölle mit rauher, trüber Oberfläche die früher beim Goldwaschen gewonnen wurden (Rheinkiesel). Seit der Mitte des 18. Jahrhunderts bekannt sind die großen Blöcke reinen Bergkristalls von Madagaskar, besonders dem Osten und Nordosten. Wichtig sind die zahlreichen großen Kristalle von der Serra dos Cristães in Goyaz (Brasilien). Sie stammen hier aus Adern in einem festen Sandstein. Auch an vielen anderen Orten findet sich Bergkristall reichlich und wird zuweilen verwendet. Manche Bergkristalle enthalten Risse, auf denen ein lebhaftes Farbenspiel, Irisieren, zu bemerken ist. Sie werden zuweilen so geschliffen, daß dieses schön hervortritt (Iris). — Rauchtopas ist braun, heller oder dunkler, bis fast schwarz (Morion). Wenn er durchsichtig ist, wird er ebenso wie Bergkristall benützt und macht mit seiner tiefen gesättigten Farbe einen sehr guten Eindruck. Er ist der einzige ganz klare braune Edelstein, der in einiger Menge und in größeren Stücken vorkommt; von den anderen, wie Axinit usw. unterscheidet er sich durch das spezifische Gewicht und den schwachen Pleochroismus. Durch schwaches Erhitzen wird mancher gelb bis braungelb (vgl. Citrin). Er findet sich wie Bergkristall im Hochgebirge der Alpen, reichster Fund in bis zentnerschweren Kristallen in dem sogenannten Kristallkeller am Tiefengletscher nahe der Furka, Kanton Uri. Früher viel geschliffen wurde der Rauchtopas vom Berg Cairngorm im nördlichen Schottland, zum Teil gelb (schottische Topase oder Cairngorms). In Goyaz findet er sich in Begleitung der Bergkristalle, aber weit spärlicher. — Amethyst. Violett, hell, fast farblos bis recht tief, bald mehr ins Rot, bald mehr ins Blau, häufig gefleckt. Je einheitlicher und tiefer die Färbung bei gleichzeitiger Durchsichtigkeit, desto höher der Wert, besonders bei größeren Stücken. Die Farbe wird, im Gegensatz zum Violettrubin, bei Lampenlicht unansehnlich graulich. Von diesem sowie auch von dem sehr ähnlich gefärbten Kunzit unterscheidet sich der Amethyst durch sein niederes spezifisches Gewicht (Gewicht = 2,65) und den schwachen Pleochroismus. Der Amethyst diente im Altertum als Amulett gegen Trunkenheit; gegenwärtig wird er, tafel- oder treppenförmig, zuweilen auch als Brillant geschliffen, graviert als Siegelstein usw., viel getragen. Er fand sich in Mandeln der Melaphyre der Gegend von Oberstein und Idar, auch sonst in den Nahegegenden und wurde früher neben dem Achat in den dortigen Schleifereien verarbeitet. Jetzt sind aber diese Fundorte erschöpft und die Schleifer beziehen ihr meistes Material aus dem südlichen Brasilien (Rio Grande do Sul) und den anstoßenden Teilen von Uruguay. Sehr schönen Amethyst liefert die Gegend von Mursinka im Ural auf Quarzgängen im Granit. Aus den ursprünglichen Lagerstätten gelangt der Amethyst auch vielfach in Seifen, so in Ceylon, Brasilien usw. Andere Fundorte sind ohne technische Bedeutung. Durch geeignetes Erhitzen werden viele Amethyste gelb, wir kommen damit zum Citrin. — Citrin ist der gelbe edle Quarz. Die Farbe ist bald hell, bald dunkel bis zum Braungelb, mehr oder weniger ähnlich der des gelben Topases, nach dem der Citrin öfters genannt wird, von dem er aber durch geringere Dichte und Härte abweicht. Je nach der Färbung werden verschiedene Nuancen mit besonderen Namen unterschieden. Die Verwendung ist von der des Amethysts nicht verschieden. Die Farbe ist meist nicht ursprünglich, sondern entsteht durch Erhitzen des Amethysts und des Rauchtopases (gebrannter Amethyst und Rauchtopas). Ursprünglich gelber und zwar braungelber Citrin begleitet allerdings in geringer Menge den Bergkristall von Goyaz und findet sich in Rio Grande do Sul und Uruguay spärlich neben dem Amethyst in den Mandeln (brauner Topas, Uruguaytopas). Dieselben beiden Staaten bringen auch viel gebrannten Amethyst in den Handel, den man an seiner Struktur oft leicht erkennt; er ist hell oder dunkel zitronengelb bis orangegelb (Goldtopas). Der „spanische Topas" ist ein prächtig braungelber, etwas ins Rötliche gehender durchsichtiger Stein, der durch Glühen des Rauchtopases von Hinojosa, Provinz Cordoba, in Spaniens eine schöne Farbe erhält (Madeiratopas). Das sind die weitaus schönsten Citrine, die man im Edelsteinhandel findet. Auch die schottischen Cairngorms sind zuweilen gelb oder nehmen durch Erhitzen diese Farbe an. — Rosenquarz ist ein trüber rosenroter Quarz

aus dem Granit von Bodenmais im bayerischen Wald, der vielfach, besonders zu kugelförmigen Perlen auf Schnüren verarbeitet wird, auf denen manchmal ein wogender Lichtschein auftritt. Neuerdings liefert auch Brasilien und Nordamerika schönes Material. — Prasem ist ein durch reichlich eingewachsene Strahlsteinnadeln gleichförmig und düster grün und undurchsichtig gewordener Quarz (sogenannte Smaragdmutter), der sich in Form von Kristallen und stengeligen Aggregaten bei Breitenbrunn in Sachsen findet und der in einzelnen Fällen als Ringstein usw. getragen wird, wie übrigens auch schon von den alten Römern. Strahlstein- oder Asbestfasern in paralleler Anordnung oder früher von solchen eingenommene feine hohle Kanäle finden sich in manchen derben, trüben, heller oder dunkler grünen, gelben oder braunen, selten farblosen Quarzen, die dann en cabochon geschliffen, denselben wogenden Lichtschein und überhaupt ein ganz ähnliches Aussehen zeigen wie das Katzenauge. Solche Quarze heißen dann auch Katzenauge (S. 946), aber im Gegensatz zum orientalischen „Quarzkatzenauge" oder okzidentalisches Katzenauge. Es ist viel weicher und leichter als jenes, und nimmt beim Schleifen nicht einen so hohen Glanz an. Es begleitet das echte Chrysoberyllkatzenauge in Ceylon und an der Malabarküste in Indien und findet sich auch bei Hof in Bayern und bei Treseburg im Harz; von diesen beiden Orten werden ebenfalls zuweilen einige Steine geschliffen. Die Schönheit beruht auf denselben Merkmalen wie beim Cymophan, der Wert ist jedoch niedriger, immerhin aber bei tadellosen Exemplaren nicht gering. Falkenauge und Tigerauge. Einem dünnplattigen Quarz sind feine Fasern des blauen Krokydolith dicht gedrängt in paralleler Lage senkrecht zu den Plattenwänden eingewachsen. Frisch ist die Farbe dunkelblau (Falkenauge, Saphirquarz), durch Verwitterung wird sie gelb bis braun (Tigerauge). Der Glanz ist seidenartig und namentlich das letztere zeigt einen prächtigen, ins Metallische gehenden goldigen Schimmer, der namentlich auf ebenen Schliffflächen nach der Faserrichtung oder auf darüber sich erhebenden flach mugeligen Flächen schön hervortritt. Die Fasern sind selten ganz gerade, vielmehr meist geknickt und gebogen, alle in demselben Stein ganz in gleicher Weise, so daß sich der Schiller beim Hin- und Herdrehen ändert: glänzende Flächenteile werden matt und matte glänzend. Namentlich das Tigerauge wird viel zum Schmuck, auch zu kleinen Gegenständen des Kunstgewerbes verwendet. Das Falkenauge trifft man viel seltener. Oefters sind beide Farben an einem Stück. Der aus Eisenhydroxyd bestehende Farbstoff des Tigerauges läßt sich mit Salzsäure ausziehen. Der Stein wird dann farblos und porös und man kann ihn künstlich färben wie Achat, ohne daß der Lichtschein verloren geht. Solche Artefakte sind oft dem Katzenauge sehr ähnlich. Das Tigerauge findet sich in großer Masse eingelagert in dem drusigen Jaspisschiefer in der Gegend von Griquatown in Griqualand West am Kap und ist jetzt sehr billig. Früher war es eine Seltenheit und stand sehr hoch im Preis. Durch Krokydolithfasern blau ist auch der Saphirquarz (Lasurquarz) von Golling im Salzburgischen, der aber nur in sehr geringem Maße als Schmuckstein Verwendung findet. Hieran schließt sich der Quarz mit deutlich erkennbaren Einschlüssen an, die ihm zuweilen ein eigenartiges hübsches Aussehen verleihen: Haar- und Nadelsteine. Der Quarz, meist Bergkrystall, von all den genannten Fundorten beherbergt vereinzelt grüne Haare und Nadeln von Strahlstein (Thetishaare), oder rote bis gelbe von Rutil (Venushaare). Manchmal sind die feinen grünen Haare knäuelartig ineinander gewirrt; es sieht aus, als enthielte der Quarz Moos eingeschlossen (Moossteine); wir werden dies bei der Betrachtung des Chalcedons wieder sehen. Der Amethyst in dem Mandelstein von der Wolfsinsel im Onegasee enthält braune Nadeln von Goethit, zuweilen radial angeordnet (Liebespfeile, flèches d'amour). Wassertropfenquarz umschließt größere mit bloßem Auge sichtbare Flüssigkeitseinschlüsse mit beweglicher Libelle. Goldquarz beherbergt mehr oder weniger zahlreiche Goldkörner. Alle diese Sachen werden ab und zu, eben oder mugelig geschliffen, zu Schmuckstücken verarbeitet.

b) Dichter Quarz. Zum Hornstein mit splitterigem Bruch gehört u. a. der apfelgrüne, kantendurchscheinende Chrysopras. Die Farbe geht bis ins Weiß und ist oft nicht ganz gleichmäßig; braune Flecken vermindern nicht selten die Schönheit und den Wert. Rein und tief gefärbte Steine werden, mugelig oder mit Facetten geschliffen, vielfach zum Schmuck verwendet. Die Farbe behält ihre Schönheit bei Lampenlicht, aber sie verblaßt leicht bei geringer Temperaturerhöhung durch einen kleinen Wasserverlust des Ni-haltigen Pigments, weshalb bei dem Gebrauch immerhin Vorsicht geboten ist. Fundorte waren früher nur in der Nähe von Frankenstein in Schlesien (Kosemütz, Gläsendorf usw.) bekannt, wo er Adern im Serpentin bildet und als schlesisches Produkt war der Chrysopras von Friedrich dem Großen sehr geschätzt. Später fand er sich auch in Kalifornien, Ostindien usw. Nachgeahmt wird er durch grünen

gefärbten Chalcedon. Wenig verbreitet als Schmuckstein ist der Holzstein, in Hornstein verkieseltes Holz, auf Querschnitten das fleckige Aussehen des Gefieders der Stare nachahmend (Starstein). Er findet sich in ganzen Stämmen im Rotliegenden am Kyffhäuser und bei Chemnitz, und besonders massenhaft in den sogenannten versteinerten Wäldern der westlichen Unionsstaaten, vor allem in Arizona, aber auch bei Mokattam, südöstlich von Kairo usw. Der Jaspis ist im Gegensatz zu dem durchscheinenden Chalcedon ganz undurchsichtig und hat einen großmuscheligen glatten und matten Bruch. Häufig ist er intensiv rot oder braun gefärbt. Der rote Jaspis bildet bis kopfgroße rundliche Knollen (Kugeljaspis), zum Teil mit gelber Hülle, die in dem Bohnerz von Auggen usw. unweit Mühlheim im Breisgau liegen (in Idar sog. Silex). Der braune Jaspis, heller und dunkler geadert und gefleckt, bedeckt dicht gedrängt in Form rundlicher, durch sturmbewegte Sandkörner abgescheuerter Knollen bis etwa von Faustgröße weite Strecken der ägyptischen Wüsten. Man glaubte in Europa früher, daß sie als Geschiebe im Nil vorkämen (Nilkiesel). Außer den genannten gibt es aber auch noch grünen, blauen, gelben Jaspis, sowie grün und rot gestreiften (Bandjaspis), alle ohne Bedeutung. Zum Jaspis gehört auch der hellgraue Stein von Nunkirchen, Kreis Merzig, der, blau gefärbt, den sogenannten deutschen Lapis liefert (siehe Lasurstein; S. 995). Einige Vorkommen besonderer Art, zum Teil mit eigenen Namen benannt, seien noch kurz erwähnt: Roter Eisenkiel, durch Eisenoxyd schön gefärbt wie die sogenannten Hyazinthen von Compostela, findet sich in dichten Aggregaten massenhaft als Kontaktgebilde am Diabas in Hessen, Nassau und Waldeck, so z. B. sehr schön bei Löhlbach am Kellerwald (Löhlbacher Achat), früher viel verwendet. Schön rotes Material kommt von Queensland. Elephantenjaspis, hellbraun mit dunkelbraunen Flecken von Baumholder a. Nahe. Zebrajaspis, dunkelbraun mit schmalen hellgelbbraunen schwach gebogenen kurzen Streifen wie Durchschnitte von Muschelschalen, aus Indien. Avanturin ist ein Hornstein, der durch zahlreiche eingewachsene Schüppchen von Biotit, zum Teil von Eisenglimmer, einen metallischen roten Schiller auf hellem Hintergrund zeigt. Er ist nicht gerade häufig und wird vielfach ersetzt durch das schönere, rotglitzernde, in Murano bei Venedig hergestellte Avanturinglas (Goldfluß), in dem kleine Kupferkriställchen in großer Menge gleichmäßig verteilt sind. Ein grüner Avanturin, grüner Hornstein mit weißem, silberigem Schiller durch eingewachsene Muscovitblättchen kommt seit kurzem aus dem Gouvernement Irkutsk in Sibirien in den Handel.

c) Chalcedon. Kantendurchscheinend bis durchscheinend (Unterschied von Jaspis) mit splitterigem Bruch; erscheint unter dem Mikroskop feinfaserig. Nach der Färbung unterscheidet man zunächst die beiden Hauptabteilungen dieses in so großem Umfange zum Schmuck verwendeten Minerals: Chalcedon im engeren Sinn mit seinen verschiedenen Varietäten: mehr oder weniger vollkommen einheitlich gefärbt; Achat: aus zahlreichen, in der Färbung verschiedenen dünnen Lagen bestehend (gestreifter Chalcedon).

Die in ihrem natürlichen Zustand meist schwach gefärbten Chalcedone sind vielfach porös. Sie saugen daher Flüssigkeiten auf und lassen sich dadurch färben, eine Kunst, die schon seit Jahrhunderten in Idar und anderwärts geübt wird und die für die dortige Steinschleiferei von größter Bedeutung ist. Ein Beispiel davon haben wir schon bei der Betrachtung des Lasursteins (deutscher Lapis) kennen gelernt. Tief schwarz erhält man durch Imprägnation des Steins erst mit Honig- oder Zuckerlösung und dann mit Schwefelsäure, die Kohlenstoff ausscheidet; blau, wie beim deutschen Lapis, mit Eisensalzen und Ferrocyankalium; grün durch Chromlösungen, wodurch Chrysopras schön nachgeahmt werden kann, rotbraun durch Eisenvitriol und nachfolgendes Glühen; rosenrot usw. durch Anilinfarben; gelb durch Kochen mit Salzsäure, milchweiß trübe durch Behandeln mit Kalilauge usw. Alle diese künstlichen Färbungen kommen von Natur beim Chalcedon nicht oder kaum vor, wie namentlich schwarz, wovon noch die Rede sein wird (Onyx).

Gemeiner Chalcedon. Die Farbe ist hellgrau, gelb oder blau, vielfach etwas wolkig. Er wird häufig en cabochon, zuweilen auch mit Facetten geschliffen; ebenso werden vielfach Perlen von verschiedener Form zum Auffassen auf Schnüren daraus hergestellt. Besonders beliebt ist gegenwärtig der hellblaue Chalcedon von Treszyta in Siebenbürgen, der zum Teil Pseudomorphosen nach Flußspat bildet, von den Schleifern fälschlich Saphirin genannt. Grauer und gelblicher Chalcedon kommt von Island, Brasilien und Uruguay, Indien, Transbaikalien und von zahlreichen anderen Orten. Der Wert, auch schöner, gleichmäßig gefärbter Steine, ist nicht sehr hoch. Abweichende Farbe oder anderweitige besondere Eigenschaften ergeben einige mit besonderen Namen belegte Varietäten: Cerachat (Wachsachat, Halbkarneol) ist ausgesprochen gelb; Punktachat (Punkt-

chalcedon oder Stephanstein) hat zahlreiche feine rote Punkte von Eisenoxyd; **Baumstein** (Mokkastein zum Teil) enthält im Innern zierliche braune oder schwarze Dendriten, die durch zweckmäßiges Schleifen der Oberfläche genähert und dadurch deutlich sichtbar gemacht werden können. Schöne Steine dieser Art sind wertvoll; in Idar sind sie gelegentlich durch Zeichnen mit Silberlösung nachgeahmt worden. Oefters sieht man nur einige fliegenähnliche schwarze Punkte (Mückenstein). **Moosachat** (Mokkastein) enthält grüne Fasern von Strahlstein oder Chloritkörnchen von derselben Farbe derart eingewachsen, daß es scheint, als hätte man Moos vor sich. Er wird in China künstlich nachgemacht. Alle diese Abarten finden sich besonders in Ostindien, im Gebiet des Dekkantrapps (s. Karneol). **Enhydros** (Wasserstein oder Hydrolith). Kleine und teilweise mit Flüssigkeit erfüllte Chalcedonmandeln aus dem Vicentinischen werden zuweilen außen geglättet und poliert, so daß das Wasser sichtbar wird, Steine dieser Art wurden namentlich in früheren Zeiten als Naturmerkwürdigkeit besonders in Nadeln getragen. Wichtig ist der **Karneol**, durch Eisenoxyd mehr oder weniger intensiv fleisch- bis blutrot gefärbt, entweder ganz einheitlich oder aus abwechselnd etwas verschieden gefärbten dünnen Lagen bestehend und dann mehr oder weniger deutlich gestreift, achatartig. Manche Exemplare sind sehr stark durchscheinend und geben dann bei tiefer Färbung, mugelig oder auch mit Facetten geschliffen, sehr schöne Steine (Karneol vom alten Stein oder männlicher Karneol). Oefters ist die Farbe durch Eisenhydroxyd mehr braun oder gelb; dann wird sie erst durch Glühen rot und dadurch wesentlich schöner. Der meiste Karneol kommt aus Indien, wo er im Dekkantrapp eingewachsen ist, außerdem aber auch aus diesem ausgewittert stellenweise in großen Mengen zusammengehäuft sich findet. Namentlich aus diesen, auf sekundärer Lagerstätte befindlichen Schuttmassen wird der Karneol gewonnen, besonders in den Bergen von Radschpipla. Genannt werden vor allem die Fundorte bei Ratanpur am unteren Nerbudda, ferner Ratschkot auf der Halbinsel Kathiawar usw. Die Steine sind oft so wie sie aus der Erde kommen, schlecht, besonders grünlich gefärbt und müssen erst erhitzt werden, daß sie schön rot werden. Auch die Achatfundorte von Brasilien und Uruguay liefern Karneol. **Sarder** (Sard) heißt der braunrote bis orangefarbige Karneol. Die braune Farbe kann, wie wir gesehen haben, künstlich nachgeahmt werden, namentlich sieht man nicht selten eine schöne, tief kastanienbraune künstliche Färbung (Sarduin). **Plasma** ist der durch Chlorit (Grünerde) gleichmäßig dunkellauchgrün gefärbte Chalcedon; **Heliotrop** (Blutjaspis) nennt man ihn, wenn rote Flecken oder Punkte auf dem grünen Hintergrund vorhanden sind. Beide werden häufig als Ringsteine getragen; sie stammen auch in der Hauptsache aus Indien.

Achat. Der Achat besteht aus zahlreichen, meist sehr feinen, übereinander abgelagerten Chalcedonschichten. Diese sind in ihrer speziellen Beschaffenheit vielfach sehr verschieden, namentlich verschieden gefärbt und verschieden porös, so daß sie sich bei der künstlichen Färbung, die hier eine große Rolle spielt, sehr verschieden verhalten; manche nehmen gar keine künstliche Färbung an, „harte" Lagen im Gegensatz zu den sich leicht färbenden „weichen". Die Form der Schicht richtet sich meist nach der Gestalt der Mandelräume, in denen der Achat fast ausschließlich vorkommt, deren Wänden die Achatlagen meist mehr oder weniger regelmäßig folgen. Man unterscheidet danach Bandachat, Festungsachat usw.). Oefters finden aber auch stärkere Abweichungen davon statt, so namentlich in vielen südamerikanischen Achatmandeln. In diesen verlaufen die Lagen nicht ganz ringsum den Mandelwänden entsprechend, sondern sie gehen von einem gewissen Punkt ab plötzlich quer durch den Mandelraum ganz eben hindurch und der davon gebildete Abschnitt der Mandel ist ganz von dieser parallelen ebenen Lagen ausgefüllt (Sardlagen, Sardsteine in Idar). Der Achat wird wegen seiner bunten, natürlichen oder künstlichen Färbung zu Schmucksachen aller Art, auch zu kleinen Gebrauchsgegenständen verarbeitet, doch ist er sehr der Mode unterworfen und wird von ihr z. Z. nicht sehr begünstigt. Schmuckstücke und Amulette aus Achat von verschiedener Form und Farbe gehen gegenwärtig in Menge zu gewissen Völkern in Nordafrika (Sudanartikel). Zur Herstellung von Gemmen, vertieften sowohl (Siegelsteine usw.) als erhabenen (Kameen) werden die verschieden gefärbten Achatlagen vielfach verwendet und namentlich im Altertum wurde große Kunstfertigkeit darin entwickelt. Die verschiedenen Lagen dienten dabei zu verschiedenen Teilen der darzustellenden Figur, weiß zu Gesicht und Händen, schwarz und rot zum Gewand usw. Achate, die aus abwechselnd weißen und farbigen Lagen bestehen, nennt man **Onyx**, und zwar Onyx im engeren Sinn, wenn die Lagen schwarz und weiß sind, wobei aber die schwarze Lage so gut wie nie natürlich, fast stets gefärbt ist, Chalcedonyx ist grau, Karneolonyx rot, Sardonyx braun, je neben weiß. Früher fand sich viel Achat mit Amethyst in den Mandeln der Melaphyre des Nahetals der

Gegend von Oberstein. Sie haben zu der Jahrhunderte alten, noch jetzt besonders in dem benachbarten Idar blühenden Steinschleiferei Veranlassung gegeben, die fast die ganze Erde mit geschliffenen Achaten usw. versorgt, wo aber jetzt auch alle anderen Edelsteine einschließlich Diamant geschliffen werden. An keinem anderen Ort ist diese Industrie in solchem Grade entwickelt, wie dort, wo alle Einwohner mehr oder weniger direkt dabei beteiligt sind. Allerdings ist das einheimische Material jetzt gänzlich erschöpft; gegenwärtig kommt der Achat mit anderen Chalcedonen zusammen mit Amethyst und Citrin aus dem südlichen Brasilien (Rio Grande do Sul) und den anstoßenden Teilen von Uruguay. Auch dort kommen diese Mineralien aus Melaphyrmandelsteinen, die aber vielfach vollständig verwittert sind, so daß die Mandeln in dem Verwitterungslehm stecken oder auch, stellenweise massenhaft, aus diesem ausgewaschen lose auf dem Boden herumliegen. Sie wurden seinerzeit zufällig von ausgewanderten Idarern gefunden und ihrer allmählich an Materialmangel leidenden Heimat zugeführt, wo dadurch der alte Industriezweig neuen Aufschwung nahm; in Brasilien selbst haben sich Schleifereien nicht entwickeln können. Der südamerikanische Achat, mit das wichtigste Rohmaterial der Idarer Schleifereien, ist in der Hauptsache hellgrau, ausgesprochene andere Farben sind selten; für die so wichtige künstliche Färbung sind sie im allgemeinen sehr günstig. Gleichmäßig graue leicht sich färbende Achate heißen dort Massiksteine, oder auch Serra-Massik, nach dem Vorkommen in der Serra do Mar; in den Serrasteinen oder streifigen Steinen wechseln färbbare mit nicht sich färbenden Lagen, letztere meist milchweiß — Lagen dieser Art färben sich nie —, miteinander ab. Andere Fundorte kommen für den Achat zurzeit kaum praktisch in Betracht, denn Indien, an das man etwa noch denken könnte, liefert neben dem einheitlich gefärbten Chalcedon (Karneol usw.) nur wenig gestreiftes Material, in Idar „Wackler" oder „Wegeler" genannt, wenn es aus sehr feinen Lagen besteht.

In Idar und Umgegend sowie in Waldkirch i. B. hat man hauptsächlich für die Quarzmineralien die alte Schleifart z. T. noch beibehalten. Große, Mühlsteinen ähnliche Sandsteinscheiben von etwa 1½ m Durchmesser drehen sich wie ein gewöhnlicher Schleifstein in senkrechter Lage um eine horizontale Achse, die durch Wasserkraft in Bewegung gesetzt wird. Der Arbeiter (Schleifer) liegt davor auf dem Bauch in einem rundlich ausgehöhlten Brett (Küraß) und drückt den zu schleifenden Achat auf die Stirnseite des Schleifsteins, wobei ein besonderes Schleifpulver nicht nötig ist. Die Politur geschieht auf rotierenden Zylindern aus weichem Holz. Dutzende von solchen Schleifmühlen (Schleifen) liegen am Idarbach und an anderen Bächen jener Gegend. Neuerer Zeit hat man die Schleifarbeit so einzurichten gesucht, daß die Arbeiter vor den Schleifsteinen sitzen, statt zu liegen, diese Reform hat aber noch keinen Anklang gefunden, überhaupt geht die Schleiferei mit Sandstein immer mehr zurück. Feinere Steine werden auch in Idar auf meist durch Elektrizität oder sonst mechanisch angetriebenen horizontalen Metallscheiben mit Diamantpulver oder einem anderen Schleifmittel (S. 934) geschliffen. Die Arbeiter dieser Art heißen im Gegensatz zu denen in den Schleifen Lapidäre.

18. Malachit u. a. Malachit wird jetzt kaum mehr zu Schmucksachen, mehr zu kleinen Gebrauchsgegenständen benutzt. Fast das gesamte Rohmaterial stammt aus dem Ural, und zwar zumeist von Medno-Rudiansk bei Nischne Tagil. Früher kamen im Ural zentnerschwere reine Blöcke vor. Noch unwichtiger ist die blaue Kupferlasur. Ein Gemenge beider wird in Amerika gegenwärtig unter dem Namen Azurmalachit verarbeitet. — Aus feinfaserigem Faserkalk und Fasergips werden zuweilen billige Schmucksachen hergestellt, die frisch wegen ihres Seidenglanzes ganz hübsch aussehen, aber bei ihrer geringen Härte leicht zerkratzt und unansehnlich werden. Ein hierzu dienendes Material ist unter anderem der zum Aragonit gehörige massenhaft vorkommende Onyxalabaster oder -marmor, oder (nach dem Vorkommen) mexikanischer Onyx oder Achat. — Flußspat wird zuweilen geschliffen, und je nach seiner Farbe falscher Topas, Smaragd, Rubin usw. genannt. Der schön dunkelblaue, auch weiß oder gelb gestreifte sogenannte „blue John" aus Derbyshire findet zu allerlei kleinen Geräten, Architekturstücken usw. Verwendung. — Es sei noch erwähnt: der Apatit, der in ausgewählten Stücken Durchsichtigkeit mit schöner Farbe verbindet. — Schwefelkies, früher viel mit Facetten geschliffen und zur Verzierung von Schuhschnallen usw. benutzt. — Etwas wichtiger ist der Hämatit (Blutstein wegen des roten Strichs); besonders der rote Glaskopf wird zu Siegelsteinen für Ringe usw. verwendet; durch das Schleifen und Polieren wird er tiefschwarz und intensiv metallisch glänzend.

19. Bernstein. Anhangsweise seien noch einige uneigentliche Mineralien organischen Ursprungs genannt, die aber doch unter den Schmucksteinen eine gewisse Rolle spielen. Nicht gering ist diese für den Bernstein. Er wird in großem Umfang mit Facetten oder eben oder en cabochon geschliffen, geschnitzt und graviert, auf der Drehbank bearbeitet, sowie zum Auffassen auf Schnüren in Form von Perlen durchbohrt, um zum Schmuck verwendet zu werden, der meiste dient aber zur Herstellung von Rauchutensilien aller Art. Die Farbe ist so gut wie ausschließlich gelb oder braun, einfarbig oder durch gleichzeitiges Auftreten mehrerer Nuancen in mannigfaltiger Zeichnung, wolkig,

gestreift usw., etwas bunt. An der Luft wird der Bernstein allmählich rot. Selten ist er ganz klar, fast stets mehr oder weniger trübe durch zahlreiche mikroskopische Luftbläschen. Farbe und Art der Trübung in Verbindung mit Größe, Form und Beschaffenheit der Stücke bedingen zahlreiche mit besonderen Namen bezeichnete Varietäten. Am geschätztesten zum Schmuck ist der sehr hell gelbe trübe perlfarbige und der dunklere bis bräunlichgelbe „kumst“farbige Bernstein (Kumst = Sauerkohl). Manche Bernsteinstücke, die sogenannten Schlauben bestehen aus dünnen übereinandergeflossenen durchsichtigen Lagen. Sie sind es, in denen man die zahlreichen Einschlüsse (Inklusen) von Pflanzen und Tieren, besonders von Insekten findet, die man zum Schmuck häufig mit benützt. Die Hauptheimat des echten baltischen Bernsteins (Succinit) ist das ostpreußische Samland, wo er in der „blauen Erde“, einer graulichgrünen glaukonitreichen tonig-sandigen Schicht des Unteroligozän seine ursprüngliche Lagerstätte hat. Aus dieser wurde er früher an mehreren Stellen in den Strandbergen ausgegraben, gegenwärtig wird er daraus ausschließlich bergmännisch gewonnen, und zwar bei Palmniken am samländischen Weststrande nördlich Pillau (Grabstein). Dies ist weitaus die Hauptmasse des im Handel befindlichen Bernsteins. Die „blaue Erde“ erhebt sich vom Strand aus wenig über das Meer und streicht sogar meist unter dem Meeresspiegel zutage aus. Daher wird der Bernstein von den Meereswellen vielfach ausgewaschen und an den Strand geworfen (Strandsegen), oder er wurde früher auch durch Taucher oder auf andere Weise (Stechen usw.) aus dem Meer herausgeholt (Seestein). Aus diesen primären Ablagerungen gelangte der Bernstein oft auch auf die sekundären Lagerstätten im Diluvium und Alluvium, aus denen er früher an zahlreichen Stellen ausgegraben wurde. Auch dies ist Grabstein, der sich vom Seestein durch eine trübe Verwitterungsschicht mit bienenwabenähnlicher Struktur unterscheidet. Aus einer sehr reichen derartigen sekundären Lagerstätte unter dem kurischen Haff bei Schwarzort nahe Memel wurden früher große Mengen Bernstein durch Baggern gewonnen (Baggerstein). In Ostpreußen ist der Bernstein Regal. Auf sekundärer Lagerstätte findet er sich übrigens auch außerhalb Ostpreußens, überall hauptsächlich nahe der Meeresküste, von Holland über Schleswig-Holstein und Pommern nach Westpreußen und bis weit nach Rußland hinein, überall, namentlich in der Elbmündung und an der schleswig-holsteinischen und jütischen Westküste nebst den vorliegenden nordfriesischen Inseln (insulae glessariae = Bernsteininseln der Alten) in einiger Menge gewonnen. Die beiden größten bisher gefundenen Stücke wiegen 9,7 und 6,3 kg; die meisten sind aber zur Herstellung von Schmuck, von Zigarrenspitzen usw. nicht groß genug; sie überschreiten nicht Erbsengröße und konnten früher nur chemisch verwertet werden zur Bereitung von Bernsteinlack und -firnis, Bernsteinsäure usw. Seit einigen Jahren werden sie in den Königlichen Bernsteinwerken in Königsberg nach einem besonderen Verfahren zu größeren rechteckigen Tafeln zusammengepreßt, die sich dann wie früher die natürlichen größeren Stücke verarbeiten lassen (Preßbernstein, Ambroid). Er ist stets trübe und zeigt wie der natürliche auf der Oberfläche kleine Farbenverschiedenheiten, aber in scharfer Abgrenzung, während die Nuancen bei jenem allmählich ineinander übergehen. Der Preßbernstein spielt gegenwärtig eine sehr erhebliche Rolle. Der Jahreskonsum an Bernstein hat zurzeit einen Wert von 2 bis 3 Millionen Mark, 1907 betrug er etwa 125000 kg Die Verwendung zum Schmuck hat in der letzten Zeit entschieden nachgelassen; große Konkurrenz machen ihm, neben einigen Imitationen ohne höhere Bedeutung (Glas, Galalith, Zelluloid usw.) die afrikanischen Copale. Außer dem echten Bernstein, dem Succinit wird der ihn im Samland begleitende, ganz ähnliche, aber weit seltenere Gedanit (spröder, mürber oder unreifer Bernstein) in derselben Weise wie jener benutzt; er läßt sich zwar noch auf der Drehbank bearbeiten, aber schwer bohren und nicht schnitzen, auch kann man kein Schraubengewinde anbringen. Ebenso spielen einige vom baltischen Bernstein nur unwesentliche verschiedene Harze aus anderen Gegenden eine gewisse Rolle. Rumänischer Bernstein (Rumänit) aus dem Bezirk Buzeu an der siebenbürgischen Grenze. Sizilianischer Bernstein, kleine runde Geschiebe aus der Mündung des Simeto (Simetit), meist durchsichtig und stark fluoreszierend). Birmanischer Bernstein (Birmit) aus der Gegend des Jadeitsteinbruchs bei Tammaw in Oberbirma. Kanadischer Bernstein (Cedarit) und Bernstein von San Domingo, Mexiko usw.

Als organisches Gebilde schließt sich endlich hier noch an der **Gagat** (vgl. Jet), eine einheitlich schwarze, sehr homogene Kohle aus den Schichten des oberen Lias der Gegend von Whitby in Yorkshire in England, wo er auch hauptsächlich zu Schmucksachen (Trauerschmuck) verarbeitet wird. In Schichten desselben Alters (Posidonienschiefer) findet man ihn auch von ganz gleicher Beschaffenheit im Schwäbischen Jura, doch hat sich hier keine Industrie wie in Whitby entwickeln können. Aus Schichten der oberen Kreide stammt das Material, das im Languedoc (Dép. de l'Aude) gewonnen und verarbeitet wird, früher mehr als jetzt. Dem Gagat wird öfters Hartgummi untergeschoben, den man aber an seiner starken Reibungselektrizität erkennen kann.

Literatur. ***M. Bauer,*** *Edelsteinkunde. 2. Aufl. 1909.* — ***W. Goodchild,*** *Precious stones. 1908.* — ***R. Brauns,*** *Das Mineralreich. 1903.* — ***E. W. Streeter,*** *Precious stones and gems. 6. Aufl. 1899.* — ***C. Doelter,*** *Edelsteinkunde. 1893.* — ***G. F. Kunz,*** *Gems and precious stones of North America. 1890.* — ***R. Blum,*** *Taschenbuch der Edelsteinkunde. 3. Aufl. 1887.* — ***A. Schrauf,*** *Handbuch der Edelsteinkunde. 1869.* — ***K. E. Kluge,*** *Handbuch der Edelsteinkunde. 1860.* — *Sehr wichtig sind die jährlichen Berichte über die Edelsteinproduktion, die in den „Reports of the department of mining statistics“, später in den „Mineral resources of the United States“ unter dem Titel: The production of precious stones veröffentlicht sind, seit 1895 von* ***G. F. Kunz,*** *seit 1906 und künftighin von* ***D. B. Sterret.*** *Dies ist eine unerschöpfliche Fundgrube von Nachrichten über Edelsteine, nicht nur aus Nordamerika, sondern von überallher.*

M. Bauer.

Schmucksteine.

Künstliche Schmucksteine.

1. Synthetische und echte Edelsteine. 2. Diamant. 3. Korund und seine Farbvarietäten: a) Die Bereitung des Rohmaterials. b) Der Apparat. c) Das Produkt. d) Die Form. e) Die Erzeugung der Farbe. f) Die physikalischen Eigenschaften. g) Einschlüsse. h) Verwendung und Verarbeitung. i) Preis. 4. Spinell. 5. Türkis. 6. Smaragd. 7. Baumstein.

1. Synthetische und echte Schmucksteine. Künstliche Schmucksteine sind solche, welche die chemische Zusammensetzung und die Eigenschaften natürlicher Schmucksteine besitzen, aber künstlich dargestellt sind. Imitationen aus Glas können nicht als künstliche Schmucksteine bezeichnet werden, auch wenn sie in ihrer Lichtbrechung oder Farbe jenen nahe kommen, weil sie deren sonstige Eigenschaften, chemische Zusammensetzung, Härte u. dgl. nicht besitzen. Dahin gehören die Similidiamanten und die farbigen Glassteine. Auch Verfälschungen, die darin bestehen, daß ein Teil des Schmucksteins ein natürlicher, der damit festverkittete andere Teil aber Glas oder ein minderwertiger natürlicher Stein ist, werden zweckmäßig nicht als künstliche Schmucksteine bezeichnet, sondern als das, was sie sind, als Dubletten oder Mixten.

Andere Schmucksteine sind wohl natürliche Mineralien, ihre Eigenschaften aber, besonders ihre Farbe, haben durch zielbewußte Behandlung eine Aenderung erfahren, sind künstlich erzeugt worden. Nicht selten führen solche gefärbte und verfärbte Steine im Edelsteinhandel einen Namen, der anderen, meist wertvolleren Schmucksteinen von ähnlicher Farbe entlehnt worden ist, was leicht zu Irrtum und Verwechslung Anlaß geben kann. Da viele dieser Steine in ihrem natürlichen Zustand kaum als Schmuckstein Verwendung finden, können sie nach der Färbung immerhin in gewissem Sinn als künstliche Schmucksteine bezeichnet werden, richtiger ist es aber, sie gefärbte oder, wenn sie ihre Farbe durch Erhitzen erhalten haben, gebrannte Steine zu nennen; sie werden im folgenden nicht berücksichtigt.

Künstliche Schmucksteine sind künstlich aus den Stoffen, welche die natürlichen Steine bilden, dargestellt worden. Die Darstellung gilt auch dann schon als im Prinzip gelungen, wenn das Produkt die Zusammensetzung und die wesentlichsten Eigenschaften des natürlichen Minerals besitzt, aber wegen der geringen Größe oder wegen Trübung oder Mißfarbe als Schmuckstein nicht verwendet werden kann. Mit Rücksicht auf ihre Herstellungsweise durch Synthese werden die künstlichen Schmucksteine auch synthetische Schmucksteine genannt. Da sie mit den natürlichen die chemische Zusammensetzung und die wesentlichen physikalischen Eigenschaften gemein haben, werden sie, besonders von Vertretern der Chemie, aber auch der Mineralogie und von Edelsteinhändlern als echt bezeichnet. Wenn man unter echt lediglich ein dem natürlichen in seinen Eigenschaften gleich kommendes Fabrikat versteht, wie z. B. bei Indigo, so läßt sich dagegen nichts einwenden, dem Sprachgebrauch entspricht diese Benennung in bezug auf Edelsteine aber gewiß nicht, da man bisher nur die Natursteine echte Steine nennt. Die Uebertragung „echt“ auf künstliche Schmucksteine würde im Edelsteinhandel eine heillose Verwirrung anrichten; man sollte echt nur natürliche Schmucksteine nennen.

2. Diamant. Diamant, bekanntlich reiner Kohlenstoff, dessen Kristalle dem regulären System angehören und sich in gleicher Weise durch ihre hohe Härte wie Stärke der Lichtbrechung und Farbenzerstreuung auszeichnen, steht nach seinem Werte und seiner Bedeutung im Edelsteinhandel an der Spitze von allen Schmucksteinen. Seine künstliche Darstellung ist gelungen, hat aber vorläufig nur wissenschaftliches Interesse; bei der besonderen Stellung, die Diamant als Schmuckstein einnimmt, dürften aber die Methoden hier doch einen Platz finden, um so mehr, als sie das Vorkommen und die etwaige Bildungsweise in der Natur aufzuklären vermögen.

Nach dem Verfahren von H. Moissan wird Eisen in einem elektrischen Ofen geschmolzen und mit Kohlenstoff übersättigt; danach wird die Schmelze plötzlich in Wasser oder geschmolzenes Blei gebracht, kühlt sich hierdurch an der Oberfläche schnell ab und erstarrt; durch den hierbei im Innern entstehenden Druck wird ein Teil des gelöst gewesenen Kohlenstoffs als Diamant abgeschieden, während der größere Teil als Graphit auskristallisiert. Der Druck wird erzeugt von dem in der Schmelze gelösten, im Moment der Erstarrung ausgeschiedenen Gas und durch die Kontraktion der äußeren erkalteten Teile der Schmelze. Nach Auflösung des erkalteten Eisens durch Salzsäure und Abscheidung des Graphits konnten sehr kleine Kristallfragmente isoliert werden, deren spezifisches Gewicht über 3 lag, die Rubin ritzten und im Sauerstoffstrom zu Kohlendioxyd verbrannten, dessen Gewicht dem des verbrannten Diamant entsprach. Diese Bildungsweise wirft auf die von Diamant in manchem Meteoreisen ein Licht. Das größte Diamantkriställchen soll $\frac{1}{2}$ mm groß gewesen sein, ihre Form der des Diamant entsprochen haben (Figur 1).

J. Friedländer hat mikroskopisch kleine,

$^1/_{1000}$ bis $^{10}/_{1000}$ mm große Kristalle, die nach ihren Eigenschaften als Diamant anzusprechen sind, erhalten, nachdem er in dünnflüssige Olivinschmelze wenig Kohle eingetragen hatte. Als Diamant wurden sie bestimmt nach ihrer Härte, Unlöslichkeit in Säuren, der hohen Lichtbrechung, dem

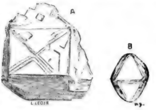


Fig. 1. Künstlicher Diamant. Nach Moissan.

hohen spezifischen Gewicht, der Kristallform und der Verbrennbarkeit in Sauerstoff. In ähnlicher Weise hat R. v. Haßlinger Diamantkriställchen dargestellt, indem er eine dem Muttergestein der Kapdiamanten analog zusammengesetzte Silikatmasse, der er Kohlenstoff zugesetzt hatte, nach dem Thermitverfahren zusammenschmolz. Beide Darstellungsweisen haben auch das gemein, daß sich der Diamant aus der Silikatschmelze ohne Mitwirkung stärkeren Druckes gebildet hat.

Nachdem es jüngst H. Boeke gelungen ist, Kalziumcarbonat unter Druck zu schmelzen und wieder kristallisieren zu lassen, darf man in Hinsicht auf die dabei ausgearbeiteten Methoden mit der Möglichkeit rechnen, daß Diamant auch in größerer Menge künstlich dargestellt wird, ob dann auch mit den für einen Schmuckstein erforderlichen Eigenschaften, wird die Erfahrung lehren.

3. Korund und seine Farbvarietäten. Korund ist kristallisierte Tonerde, Al_2O_3; die Kristalle sind hexagonal-rhomboedrisch, in reinem Zustande farblos, meist aber durch Beimischungen gefärbt; er ist nächst Diamant das härteste Mineral. Wegen der hohen Härte, schönen Farbe oder besonderen Lichterscheinungen (Asterismus) sind Varietäten von Korund von altersher beliebte Schmucksteine, und unter allen Edelsteinen steht der klare und schön gefärbte rote Korund, der Rubin, seinem Werte nach an der Spitze, werden doch für einen 2- bis 4-karätigen Stein 400 bis 1000 Mark für das Karat bezahlt, für größere Steine aber weit mehr als 3000 M. per Karat. So ist es erklärlich, daß man sich um die künstliche Darstellung des Rubins besonders bemüht hat. Die Darstellung von Korund selbst bietet in keiner Weise besondere Schwierigkeit; namentlich wird er massenhaft erzeugt bei dem Goldschmidtschen Thermitverfahren, das heute zum Schweißen von Schienen und zur Herstellung gewisser Metalle ausgedehnt verwendet wird. Dieser und der auf andere Weise erzielte Korund ist aber trüb, kein Edelkorund, kein Schmuckstein. Ueber die zuerst gelungene Synthese von klarem, oder zu Schmuckstein brauchbarem Korund ist wenig positives bekannt, man weiß nur, daß vom Jahre 1882 an größere künstliche Rubine als rubis de Genève in den Handel kamen, von denen das Karat mit 100 M. und mehr bezahlt wurde; sie sind bald wieder vom Markt verschwunden. Dasselbe gilt für die rubis reconstituées, die im Anfang der 90-er Jahre von Paris aus in den Handel kamen; es waren Steine, die nach dem Verfahren des Chemikers Michaud durch Zusammenschmelzen kleiner Abfallstücke von Rubin hergestellt waren, bestanden also aus echtem Material, nur ihre Größe war künstlich erzeugt.

Im Jahre 1891 hat E. Frémy das Ergebnis seiner gemeinsam mit A. Verneuil jahrelang fortgesetzten Versuche, die ihn zur künstlichen Darstellung des Rubins geführt haben, in einer besonderen Schrift bekannt gemacht. Die besten Resultate erhielt Frémy durch Schmelzen eines Gemisches von amorpher Tonerde, der etwas Kaliumcarbonat zugesetzt war, mit Fluorkalzium oder Fluorbaryum und ein wenig

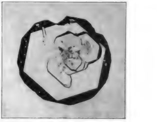


Fig. 2. Ein kleiner Frémyscher Rubin, 30 mal vergrößert.

Kaliumbichromat in porösen Tiegeln. Hierbei bildet sich wahrscheinlich vorübergehend Aluminiumfluorid, das durch Wasserdampf, der als Verbrennungsgas durch die poröse Tiegelwand zutreten konnte, in Aluminiumoxyd verwandelt wurde nach der Formel

$$2AlF_3 + 3H_2O = Al_2O_3 + 6HF.$$

Der auf diese Weise dargestellte Rubin bildet kleine, scharfe, von einem Rhomboeder und der Basis begrenzte und nach

der Basis tafelförmig ausgebildete Kristalle, die durch aufgenommenes Chromoxyd die schöne rote Farbe des feinen natürlichen Rubins besaßen. Die Kristalle waren immer sehr klein und dünn, nur wenige Millimeter breit, ihre Herstellung war kostspielig, praktische Bedeutung hat sie nicht erlangt. Die auf diese Weise hergestellten Rubine sind wohl auch rubis scientifiques genannt worden. Wie in der Form und Farbe stimmen diese Rubine auch in der Lichtbrechung und Stärke der Doppelbrechung mit den natürlichen überein. Die Brechungsexponenten hat Melczer gemessen, die eines dunkelroten Rubins von Birma sind zum Vergleich daneben gestellt:

	C.	D.
Frémyscher Rubin	$\omega = 1{,}7681$	1,7715
	$\varepsilon = 1{,}7597$	1,7630
Birmarubin	$\omega = 1{,}7685$	1,7715
	$\varepsilon = 1{,}7594$	1,7632

In vollkommener Weise ist die Synthese des Rubins Marc Paquier und besonders A. Verneuil in Paris gelungen, der sich seit dem Jahre 1888, anfangs gemeinsam mit Fremy, damit beschäftigt und seine Erfahrungen im Jahre 1902 und 1904 veröffentlicht hat. Die Darstellung nach dem Verfahren von Verneuil zerfällt in zwei Prozesse, die Herrichtung des Rohmaterials und das Schmelzen des Tonerdepulvers in hierzu besonders konstruierten Apparaten.

3a) Bereitung des Rohmaterials. Die Tonerde wird aus Ammoniak-Tonerdealaun, der durch mehrmaliges Umkristallisieren gereinigt ist, gewonnen, indem ihr Hydrat aus der Alaunlösung durch Ammoniak gefällt, ausgewaschen, getrocknet, geglüht und aufs feinste gemahlen wird. Das zur Erzielung der roten Farbe erforderliche Chromoxyd wird entweder als solches dem Pulver zugesetzt oder aus einer isomorphen Mischung von Ammoniak-Tonerdealaun mit Chromalaun in derselben Weise dargestellt wie die reine Tonerde. Der Gehalt des Pulvers an Chromoxyd beträgt je nach der Intensität der Farbe, die erzielt werden soll, bis zu 2,5%. Zur Beförderung der Kristallisation wird nach den Angaben Verneuils dem Pulver eine kleine Menge von Kaliumcarbonat zugesetzt. Ueber diese und etwaige andere Zusätze ist schwer etwas Zuverlässiges zu erfahren, da dies geheim gehalten wird.

3b) Apparat. Der von Verneuil zur Synthese des Rubins konstruierte Apparat ist von ihm in den Annales de Chimie et de Physique, 8. serie, t. III, im Jahre 1904 beschrieben und abgebildet worden. Die in Deutschland zur Verwendung kommenden Apparate sind genau nach dem gleichen Prinzip gebaut. Der obere Teil besteht aus einer zylindrischen, nach unten konisch zulaufenden Büchse P, welche das Tonerdepulver aufzunehmen hat; am unteren Ende der Büchse befindet sich ein Sieb, das nur feinst verteiltes Pulver hindurchläßt, oben ist die Büchse durch einen Deckel verschlossen. Damit das Pulver hindurchfällt, wird die Büchse in kurzen Zwischenräumen erschüttert, entweder durch einen elektrischen Hammer M oder dadurch, daß der Deckel durch einen Stift gehoben wird und wieder niederfällt. Dies wird durch einen an einer Welle befindlichen Stift bewirkt, die über die in einer Reihe aufgestellten Apparate hinläuft und durch eine Maschine oder Uebertragung gedreht wird. Der Deckel ist auf der Büchse exzentrisch drehbar und durch eine Verschiebung kann die Stärke der Erschütterung reguliert werden. Durch diese Vorrichtung wird eine der wesentlichsten Bedingungen zur Synthese erfüllt, das gleichmäßige Ausstreuen des Pulvers in fein verteiltem Zustand, was Verneuil „semage“, die Aussaat, nennt.

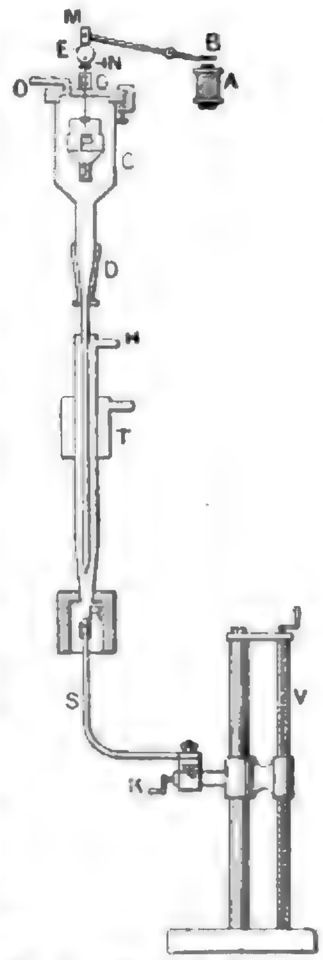


Fig. 3. Der von A. Verneuil zur Synthese des Rubins konstruierte Apparat.

Das durch die Erschütterung herausfallende Pulver — jedesmal nur sehr wenig — wird durch den in den oberen Teil des Apparates bei 0 eingepreßten Sauerstoff nach unten geblasen und fällt in einer eisernen, nach unten sich verjüngenden Röhre, die genau vertikal gerichtet sein muß, auf einen in der Mitte des Apparates befindlichen, etwa bleistiftdicken Stift R aus feuerfestem Material und wird auf diesem geschmolzen. Wesentlich ist hierbei, daß der geschmolzene Tropfen die Unterlage nur in einem Punkt berührt, um das Rissigwerden der Schmelztropfen zu vermeiden.

Die erforderliche hohe Temperatur wird durch Leuchtgas (oder Wasserstoff) und Sauerstoff erzeugt, der Sauerstoff wird einer Bombe entnommen, die neben dem Apparat aufge-

stellt ist; das Zuströmen von Leuchtgas bei H und Sauerstoff bei 0 kann genau reguliert und so bemessen werden, daß die höchstmögliche Temperatur erzielt wird. Der erwähnte feuerfeste Stift ist in einem Träger S im unteren Teil des Apparates befestigt und daß der Schmelztropfen sich an der heißesten Stelle befindet. Sobald alles in Ordnung ist, verläuft der Prozeß, ohne daß ein Eingriff nötig wäre, so daß eine Person etwa 10 Apparate bedienen kann. In der in Verbindung mit den Elektrochemischen Werken



Fig. 4. **Fabrikanlage zur Herstellung von Rubinen von M. Alexandre in Sarcelles. Aus Boyer-Großmann, Die Synthetischen Edelsteine.**

kann durch eine besondere Vorrichtung K, V vertikal gehoben und gesenkt werden; er muß mit seiner Spitze in den heißesten Teil der Flamme geführt werden. Dieser eigentliche Schmelzofen ist also offen; um den Zug abzuhalten, die volle Hitze zur Geltung kommen zu lassen und langsame Abkühlung zu ermöglichen, wird der Mittelteil des Apparates von feuerfesten Muffeln umgeben; in der vordersten befindet sich ein Fenster aus Kobaltglas, durch welches der Verlauf des Prozesses beobachtet werden kann. Im einzelnen mögen die Apparate geringfügige Abweichungen zeigen, im Wesen stimmen die in den deutschen Fabriken gebrauchten mit den französischen überein. In einer Fabrik sind viele solcher Apparate je in einer Reihe aufgestellt und die Bedienung hat nur darauf zu achten, daß Leuchtgas und Sauerstoff gleichmäßig zuströmt, daß die Büchse regelmäßig erschüttert wird, daß der Stift, auf dem der Schmelztropfen sich bildet, genau vertikal steht und in Bitterfeld errichteten Anlage der Deutschen Edelsteingesellschaft sollen 600 derartige Apparate aufgestellt sein.

3c) Das Produkt. Nachdem der Apparat in Gang gesetzt ist, bildet sich auf jenem Stift aus dem zuerst fallenden Pulver ein winziges Tröpfchen, aus dem allmählich ein birnförmiger Schmelztropfen, mit der Spitze nach unten gerichtet, herauswächst, der meist von einem Kegel zusammengesinterten Pulvers umgeben ist (der linke Schmelztropfen in Figur 5). Zur Bildung eines Schmelztropfens von 5 bis 10 g, das ist 25 bis 50 Karat sind 2—4 Stunden nötig; kleinere Schmelztropfen darzustellen, lohnt sich nicht, für größere fehlt aus naheliegenden Gründen die rechte Verwendung, es können aber solche von 100 Karat hergestellt werden: der in der Mitte der Figur 5 abgebildete Schmelztropfen mit hexagonal-prismatischer Form wiegt 13,6 g, also etwa 68 Karat. Als erreichbare Tagesproduktion der Deutschen Edelsteingesellschaft bezw. der Elek-

trochemischen Werke Bitterfeld werden 4000 Karat angegeben, die französischen Fabriken sollen das doppelte produzieren können, zuverlässige Zahlen sind aber nicht zu er-



Fig. 5. Schmelztropfen von synthetischem Rubin. Der mittlere besitzt Kristallform, hexagonales Prisma.

halten. Natürlich richtet sich die Produktion nach dem Bedarf, und es steht nichts im Wege, daß sie bei etwa steigender Nachfrage erhöht wird, da das Rohmaterial in beliebiger Menge dargestellt werden kann.

3d) Die Form. Die Schmelztropfen haben meist kegelförmige Gestalt; mit der Lupe nimmt man auf der breiten oberen Fläche feine, sich regelmäßig durchkreuzende Linien wahr, die schon beweisen, daß der Tropfen Kristallstruktur besitzt, und die genauere Untersuchung ergibt in der Tat, daß jeder Tropfen ein einheitlicher Kristall ist, daß er oft sogar regelrechte ebene Kristallflächen besitzt und daß seine Kristallisation mit der des natürlichen Korunds im wesentlichen übereinstimmt. Am häufigsten tritt als ebene Fläche die Basis (0001) auf, aber meist nicht in ihrer Lage mit der breiten Fläche des Schmelztropfens zusammenfallend, sondern beliebig schief am Kegelmantel. Zuweilen sind die Schmelzkörper durch zwei gegenüberliegende ebene Basisflächen dicktafelig, was besonders häufig bei gelben und eosinfarbigen Varietäten zu beobachten ist. Daß diese ebene Fläche der Basis entspricht, geht daraus hervor, daß eine ihr parallel geschliffene Platte im konvergenten polarisierten Licht das Interferenzbild einachsiger, oder durch Spannung zweiachsig gewordener Kristalle gibt, also senkrecht zur optischen Achse liegt. Auch durch Untersuchung des Tropfens mit der dichroskopischen Lupe läßt sich das gleiche feststellen. Außer der Basis tritt auch ein hexagonales Prisma auf, so daß im besten Fall rings um den Kegelmantel, dessen Rundung unterbrechend, sechs ebene glänzende Flächen zu sehen sind; der Umriß der oberen Fläche ist dann nicht mehr kreisrund, sondern sechseckig (der mittlere Kristall der Figur 5), der Schmelztropfen beweist so auch durch seine Form, daß er ein Kristall ist. Nach dem mir vorliegenden Material, das ich dem Vorsitzenden des Aufsichtsrates der Deutschen Edelsteingesellschaft, Herrn Dr. Rothe und Herrn H. Wild verdanke, bilden sich die scharfen Prismenflächen besonders in dem oberen Teil größerer Schmelztropfen aus, so daß diese im unteren Teil Kegelform, im oberen Teil aber polyedrische Kristallform besitzen. Aus der Tatsache, daß die Schmelzkörper homogene Kristalle sind, muß man schließen, daß der zuerst gebildete Tropfen auf die sich danach ablagernde Substanz richtend gewirkt hat, daß der ganze Schmelztropfen gewachsen ist wie ein Kristall in seiner Lösung. Wie ein solcher leicht einen Aufbau aus einzelnen Schichten erkennen läßt, so auch ein synthetischer Korund, jedoch um so seltener, je mehr Sorgfalt auf die gleichmäßige Mischung des Pulvers und den gleichförmigen Verlauf der Bildung des Schmelztropfens gelegt wird. Zwillingsbildung, wie sie bei natürlichem Korund, auch in geschliffenen klaren Steinen vorkommt, ist an synthetischen noch nie beobachtet worden.

3e) Erzeugung der Farbe; Farbvarietäten. Kristallisierte Tonerde ist in chemisch reinem Zustand farblos, als Schmuckstein führt farbloser Korund den Namen weißer Saphir oder Leukosaphir. Synthetisch kann dieser in höchster Vollkommenheit hergestellt werden. Die rote Farbe des Rubin wird, wie schon vorher erwähnt, durch Zusatz von Chromoxyd erzeugt; je nach der Menge, in der es zugesetzt wird, werden Steine erzielt, die dem dunklen Birmarubin, dem taubenblutfarbigen Ceylonrubin oder dem Hellrosarubin gleichen. Die Synthese des blauen Saphirs ist A. Verneuil erst nach vielen vergeblichen Versuchen (s. bei Spinell) gelungen, die Methode ist von ihm im Januar 1910 bekannt gegeben worden. Hiernach wird die blaue Farbe durch Zusatz einer Mischung von Eisenoxydoxydul (1,5% Fe_3O_4) und Titandioxyd (0,5% TiO_2) erzeugt. Auch Chromoxydul soll blaue Färbung erzeugen, ist aber für praktische Verwendung nicht geeignet. Blauer Saphir vom zartesten Wasserblau bis zum tiefsten Blau wird jetzt von den elektrischen Werken Bitterfeld in großer Vollkommenheit hergestellt, und wie es heißt, produzieren sie von diesem bessere Qualität und größere Quantität als die französischen Fabriken, die sich vorzugsweise mit der Herstellung von Rubi-

nen befassen. Zur Herstellung des **gelben Saphirs** dienen Zusätze von Eisen, Nickel, Uran, Titan, Thallium, vermutlich auch noch andere Stoffe und oft nicht nur je einer, sondern mehrere zugleich; die Farben der synthetischen Steine variieren, je nach den Zusätzen, von hell zitronengelb bis zu dunkel weingelb und gelblichrosa, diese in der Färbung dem in der Natur seltenen Padparadschah nahekommend. Eine andere Farbvarietät, die bei Tageslicht graulichgrün bis rötlichviolett, bei Lampenlicht aber mehr rosa erscheint und die wegen dieses Farbenwechsels unter dem irreführenden Namen Alexandrit in den Handel gebracht worden ist (echter Alexandrit, bei Tageslicht smaragdgrün, bei Lampenlicht rubinrot, ist $BeO.Al_2O_3$), enthält einen Zusatz von Vanadin. Violettrubin, auch orientalischer Amethyst genannt, wird in großer Schönheit synthetisch dargestellt; ob seine Farbe durch eine Beimischung von Mangan oder Vanadin erzielt worden ist, ist nicht zu erfahren, wie überhaupt Näheres über die Zusätze zu den Farbvarietäten, welche die Deutsche Edelsteingesellschaft zuerst hergestellt hat und herstellt, etwas zuverlässiges nicht zu erfahren ist, während Verneuil in seinen Veröffentlichungen über die Synthese des Rubin und Saphir auch die Stoffe angibt, durch welche er die Farbe erzeugt hat. Es heißt aber, daß auch diese Angaben nicht vollständig seien. Außer den Farbvarietäten, welche unter den natürlichen Edelkorunden vorkommen, werden synthetisch auch solche hergestellt, die unter jenen nicht vertreten sind. Eine Farbentafel gibt über die von der Deutschen Edelsteingesellschaft hergestellten Farbvarietäten Auskunft.

3f) Die physikalischen Eigenschaften. Die physikalischen Eigenschaften der synthetischen Korunde stimmen mit denen der natürlichen in hohem Grade überein; Abweichungen erklären sich leicht aus ihrer Herstellungsweise. Die Schmelztropfen springen leicht der Länge nach mit glatten Bruchflächen in zwei Hälften, sie sind spröder und lassen sich schwieriger polieren. Namentlich die Herstellung von ebenen, spiegelnden Flächen, wie sie an Prismen zur Messung des Winkels und der Brechungsexponenten notwendig sind, bietet besondere Schwierigkeit, während die Politur der Schmucksteine, bei der es auf vollkommen ebene Flächen nicht so sehr ankommt, ohne Mühe gelingt. Das in Platten senkrecht zur optischen Achse im konvergenten polarisierten Licht auftretende Interferenzbild läßt öfters optische Zweiachsigkeit wahrnehmen, besonders nach dem Rande der Platte hin. Beides erklärt sich durch die verhältnismäßig schnelle Abkühlung der Schmelztropfen, durch welche Spannungen und damit jene Begleiterscheinungen eintreten. Hiermit mag es auch in Beziehung stehen, daß die Härte der synthetischen Steine nach Angabe der Schleifer größer ist als die der natürlichen.

Das spezifische Gewicht der synthetischen Korunde stimmt innerhalb der Fehlergrenzen mit dem der natürlichen überein und liegt zwischen 3,94 bis 4,0. Dasselbe gilt für die Lichtbrechung und Stärke der Doppelbrechung; R. Brauns hat für die Brechungsexponenten die folgenden Werte gefunden:

		Li	Na	Tl
Farbloser synthetischer Korund	$\omega =$	1,7643	1,7681	1,7717
	$\varepsilon =$	1,7563	1,7599	1,7634
Dunkelroter synthetischer Rubin	$\omega =$	1,7680	1,7709	—
	$\varepsilon =$	1,7598	1,7629	—
Sogenannter Alexandrit	$\omega =$	1,7652	1,7686	1,7725
	$\varepsilon =$	1,7569	1,7605	1,7646

Man vergleiche hiermit die vorher angegebenen Werte für den Frémyschen Rubin und den natürlichen Birmarubin. Auch der Dichroismus der synthetischen Steine stimmt bei gleicher Farbe mit dem der natürlichen überein, und wie dieser wird auch der synthetische beim Glühen schmutzig graulichgrün, um beim Erkalten wieder ebenso dunkelrot zu werden wie zuvor.

3g) Einschlüsse. Die synthetischen Korunde enthalten bisweilen Einschlüsse von feinem staubförmigem Pulver, Glas und Luftbläschen, was sich aus ihrer Herstellungsweise leicht erklärt. Mit dem Fortschritt in der Synthese sind diese gegen früher stark zurückgetreten, so daß geschliffene Steine oft frei von allen Einschlüssen sind. Einschlüsse von feinen Nädelchen, wie sie dem feinen natürlichen Rubin kaum je fehlen, von Flüssigkeitseinschlüssen, wie sie im natürlichen Saphir vorkommen, sind in den synthetischen Steinen niemals vorhanden, so daß diese zur Erkennung der natürlichen dienen können. So ist es auch nicht gelungen und wird nicht gelingen, den Sternsaphir künstlich darzustellen.

3h) Verwendung und Verarbeitung. Außer als Schmuckstein und im Kunstgewerbe werden die synthetischen Korunde wegen ihrer Härte als Achsen- und Zapfenlager bei Uhren und anderen Präzisionsinstrumenten, besonders auch in der elektrischen Industrie für Meßinstrumente benutzt, und zwar dient hierzu ausschließlich synthetischer Rubin, weil dieser weniger spröd ist als die anderen Varietäten, auffallenderweise auch weniger spröd als der farblose Korund. Die als Schmucksteine zur Verwendung kommenden werden zum Teil nach Indien und Ceylon exportiert und von hier aus mit den echten Steinen in den Handel gebracht.

Zur Bearbeitung werden die Schmelztropfen in kleine Teile zerschnitten und dann wie die anderen Edelsteine geschliffen und poliert. Die zu Schmucksteinen brauchbaren werden in Deutschland besonders in Idar geschliffen, die für die Uhrenindustrie und die sonstigen Lagersteine im französischen Jura und neuerdings auch in Idar.

3i) Preise. Die Preise der synthetischen Korunde, welche nach dem Gesetz im Handel ausdrücklich als solche bezeichnet werden müssen, sind im Großhandel außerordentlich niedrig, der Marktwert des Rohkarats Rubin beträgt etwa 10 Pf. Im Kleinhandel kostet das Karat geschliffener Steine je nach der Qualität von Rubin 1,20 bis 3 M., blauem Saphir 5 bis 8 M., farblosem Saphir 2 bis 4 M., gelbem Saphir 2 bis 5 M., sogenanntem Alexandrit 8 bis 12 M. Trotz oder richtiger wohl wegen dieser niederen Preise ist der Gewinn, den die Deutsche Edelsteingesellschaft durch die synthetischen Steine erzielt, zurzeit noch sehr gering und steht in keinem Verhältnis zu dem angelegten Kapital, allerdings ist das Unternehmen als Aktiengesellschaft noch sehr jung.

4. Spinell. Spinell ist eine Verbindung von Magnesia mit Tonerde und kristallisiert als reguläres Oktaeder. In chemisch reinem Zustande farblos, ist der klare edle Spinell durch geringe Beimischungen rot in verschiedenen Nuancen, seltener blau, gefärbt. Der rote Spinell ist in der Farbe dem Rubin sehr ähnlich und wird daher auch Rubinspinell oder Balasrubin genannt; er unterscheidet sich von ihm durch seine reguläre Kristallform, einfache Lichtbrechung, geringere Härte ($H = 8\frac{1}{2}$) und geringeres spezifisches Gewicht ($G = 3{,}60$ bis $3{,}63$). Die künstliche Darstellung von Spinell in mikroskopisch kleinen Kristallen ist schon längst gelungen, die großer Kristalle erfolgte bei dem Versuche, blauen Saphir herzustellen; die Methode ist die gleiche wie die bei Korund beschriebene.

In der Annahme, daß die blaue Farbe von Saphir durch Kobalt erzeugt werden könne, haben A. Verneuil und L. Paris dahingehende Versuche zur Synthese des Saphirs gemacht, aber ohne Erfolg, die Tonerde nahm bei der Kristallisation das Kobalt nicht an. Dies geschah erst, nachdem dem Pulver noch Magnesia zugesetzt war; es bildeten sich klare, kobaltblaue Schmelztropfen mit nur $^1/_{50}$% CoO, die zuerst als synthetischer Saphir in den Handel gekommen sind; sie haben aber nicht die Zusammensetzung und die Eigenschaften von Saphir, sondern von Spinell. Ihre Form, bisweilen von einzelnen ebenen Flächen umschlossen, ist die eines regulären Oktaeders; R. Brauns hat den Winkel zwischen zwei Flächen zu 70° 31′ 10″ gemessen, was von dem berechneten Wert um nur 34″ abweicht; sie sind einfachbrechend oder durch Spannung schwach anomal doppelbrechend, ihr spezifisches Gewicht beträgt 3,62, der Brechungsexponent 1,73. Nachdem die Synthese des blauen Saphirs vollkommen gelungen ist, hat die des Spinells praktisch keine Bedeutung, aber wissenschaftlich bleibt sie interessant; dasselbe gilt für die Synthese des roten Spinells, die in der gleichen Weise gelungen ist.

5. Türkis. Türkis ist wasserhaltiges Aluminiumphosphat ($2Al_2O_3.P_2O_5.5\,H_2O$) von kryptokristalliner Beschaffenheit und rein himmelblauer Farbe, die auf der Beimischung einer Kupferverbindung beruht. Ein Produkt von derselben chemischen Zusammensetzung und den Eigenschaften des natürlichen Türkises wird in der Weise hergestellt, daß ein durch Kupfersalze blau gefärbter Niederschlag von phosphorsaurer Tonerde unter starkem Druck gepreßt wird. Da wegen der Beschaffenheit des Türkises optische Untersuchungsmethoden versagen, ist die Unterscheidung des künstlichen vom natürlichen Türkis sehr schwierig; er soll beim Glühen nicht wie der echte zerspringen, sondern zusammensintern.

6. Smaragd. Unter dem Namen „rekonstituierter Smaragd“ kommt ein Produkt in den Handel, das die Farbe des echten Smaragd hat, auch analysenfest sein mag, aber doch kein synthetischer Smaragd ist, da er nicht die sonstigen Eigenschaften eines solchen besitzt. Die eine Art ist homogen, klar, schön smaragdgrün, aber amorph, einfachbrechend mit Spuren von Spannungsdoppelbrechung, also ein Glas; das spezifische Gewicht beträgt nur 2,55 gegen 2,67 des echten Smaragd. In Glanz, Farbe und Härte kommt dieses Produkt dem echten sehr nahe. Eine andere Art besteht aus zwei Teilen von nahezu farblosem Aquamarin, die durch eine dünne Schicht von smaragdgrünem Glas miteinander verschmolzen sind. Die Steine haben die Zusammensetzung und Eigenschaften von Smaragd, sind aber, in Oel eingetaucht, sehr leicht als zusammengesetzt zu erkennen. Bei einer dritten Art bestehen beide Teile oder nur der eine aus Bergkristall und die Hälften sind wieder durch chromhaltiges Glas zusammengeschmolzen oder nach Einschaltung eines grün gefärbten Gelatineblättchens zusammengeklebt. Die Fälschung kann leicht erkannt werden. Die Synthese des Smaragds als Schmuckstein, der des Rubins analog, ist noch nicht gelungen wohl aber die von kleinen Kristallen. Solche, von der Deutschen Edelsteingesellschaft, H. Wild, in jüngster Zeit dargestellt, sind von dem hexagonalen Prisma mit der Basis begrenzt und besitzen nach meiner Untersuchung die Lichtbrechung, Doppelbrechung, Farbe und den Pleochroismus

des echten Smaragds, so daß es vielleicht nur noch eine Frage der Zeit ist, daß dieser kostbare Schmuckstein in der erforderlichen Größe und mit allen Eigenschaften des echten Smaragds synthetisch dargestellt werden kann. — In der gleichen Weise wie Smaragd werden auch die weniger wertvollen, unter dem Namen Aquamarin bekannten Varietäten des Beryll durch Be-haltige Glasflüsse nachgemacht, synthetische Edelsteine sind dies nicht, sondern grobe Fälschungen.

7. **Baumstein.** Als künstliche Schmucksteine im weiteren Sinne können solche bezeichnet werden, die ihre Qualität als Schmuckstein erst durch eine künstliche Behandlung erhalten haben. Es wird hier abgesehen von denen, deren Farbe durch Färben, Brennen oder Bestrahlung irgendwelcher Art gegen die ursprüngliche eine Aenderung erfahren hat, wie Achat, Rauchquarz, Amethyst, Topas u. dgl., es soll hier nur der sogenannte Baumstein erwähnt werden. Es ist dies ein Chalcedon, der im Innern braune oder schwarze Dendriten enthält, Zeichnungen, die einem Baum oder Strauch gleichen und durch Absatz aus mangan- und eisenhaltigen Lösungen entstanden sind. Bei regelmäßiger Zeichnung werden natürliche Baumsteine recht teuer bezahlt. Derartige Zeichnungen werden jetzt künstlich in beliebiger Feinheit dadurch hergestellt, daß die polierte Oberfläche des Chalcedons mit Wachs überzogen und in dieses die Zeichnung eingekratzt wird. Danach wird Höllensteinlösung aufgetragen und der Stein, wenn sie genügend eingedrungen ist, gebrannt und noch einmal poliert. Wie bei dem echten Baumstein befindet sich die Zeichnung im Innern des Chalcedons und kann nur schwer als künstlich erkannt werden, am ersten noch durch die große Regelmäßigkeit der Zeichnung und des meist tiefen Tones des Pigments.

Literatur. ***H. Grossmann und A. Neuburger,*** *Die synthetischen Edelsteine. Nach Jacques Boyer. Berlin 1910.* — ***H. Moissan,*** *Der elektrische Ofen. Deutsch von Zettel. Berlin 1897.* — ***J. Friedländer,*** *Herstellung von Diamanten in Silikaten entsprechend dem natürlichen Vorkommen in Kapland. Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleißes. Berlin 1898.* — ***Frémy,*** *La synthèse du rubis. Paris 1891.* — ***A. Verneuil,*** *Production artificielle du rubis par fusion. Ann. de Chim. et de Phys., 8. série, t. III., 1909 und Compt. rend.* **135, 147, 151.** — ***Derselbe,*** *Sur la réproduction synthétique du saphir par la méthode de fusion. Compt. rend.* **151**, *1910.* — ***R. Brauns,*** *Künstliche Edelsteine. Aus der Natur 4., 5. und 6. Jahrgang. 1908 bis 1910.* — ***Derselbe,*** *Die Brechungsexponenten einiger künstlicher Edelsteine. Centralblatt für Mineralogie, 1909.*

R. Brauns.

Schönbein

Christian Friedrich.

Wurde am 18. Oktober 1799 zu Metzingen in Schwaben geboren und starb am 29. August 1868 auf dem Gute Sauersberg bei Baden-Baden. Ueber das Leben und mannigfaltige Wirken dieses hervorragenden Naturforschers gibt die ausführliche Biographie von G. W. A. Kahlbaum und Ed. Schär: „Christian Friedrich Schönbein, 1799—1868, ein Blatt zur Geschichte des 19. Jahrhunderts" (Leipzig, 1. Band 1899, 2. Band 1901) beste Auskunft. Auch sein Briefwechsel mit Liebig (daselbst 1900 erschienen) eröffnet Einblicke in das Leben und Wesen des eigenartigen Forschers; ganz besonders tut dies seine Schrift: „Menschen und Dinge; Mitteilungen aus dem Reisetagebuch eines deutschen Naturforschers" (Gotha 1855).

Sein Leben war, abgesehen von seinen Lehr- und Wanderjahren, in denen er als Autodidakt meist auf sich und seine Ausbildung angewiesen war, das stille, der Wissenschaft gewidmete eines deutschen Gelehrten. Er war von 1828 an bis zu seinem Tode Professor der Chemie an der Universität Basel.

Seine Haupttätigkeit galt den Experimentalforschungen, und hier sind außerordentlich wichtige Arbeiten zu verzeichnen. Die ersten größeren Untersuchungen betrafen die Passivität des Eisens und im Zusammenhang damit umfassende elektrische Beobachtungen verschiedener Art, namentlich über den Ursprung der Volta-Elektrizität. Hier nahm bald die Entdeckung und nähere Beschreibung des Ozons und seiner Wirkungen den Forscher voll in Anspruch; seine bahnbrechenden Arbeiten in diesem Gebiete erstrecken sich über die Jahre 1839 bis 1860. Die gründliche Beschäftigung mit Sauerstoff und seinen Wandlungen führten Schönbein zur Untersuchung der langsamen Oxydation von anorganischen wie organischen Stoffen (Sauerstoffpolarisation und Autoxydation), zur Lehre von Ozoniden und Antozoniden: Forschungen, die bahnbrechend gewirkt und den Grund gelegt haben zur heutigen Lehre von den Erscheinungen der Autoxydation. In nahem Zusammenhang damit standen die wichtigen, bis in sein Todesjahr fortgesetzten Arbeiten über katalytische Wirkungen, über die Einwirkung von Fermenten auf Sauerstoff und auf Wasserstoffsuperoxyd, sowie über die Katalyse des letzteren u. a. m.

Weiteren Kreisen wurde Schönbein besonders bekannt durch seine denkwürdige Entdeckung der Schießbaumwolle und im Zusammenhang damit des Collodiums: seine ersten Beobachtungen fallen in den Anfang des Jahres 1846. Unabhängig von ihm hat ein wenig später Rudolf Böttger in Frankfurt gleichfalls das Verhalten der Baumwolle zu Salpeter-Schwefelsäure untersucht. Beide Forscher vereinigten sich zur Ausnutzung ihrer Entdeckung. Die heutige Blüte des Sprengstoffwesens ist ohne den ersten starken Anstoß, der von Schönbein ausging, undenkbar.

Die natürliche Bildung von Nitraten in der Natur hat ihn lange Zeit beschäftigt und zu sehr bedeutsamen Beobachtungen über die sogenannte Nitrifikation geführt.

Die meisten und zugleich wichtigsten Unter-

suchungen Schönbeins sind in Poggendorffs Annalen und im Journal für praktische Chemie veröffentlicht, einige auch als besondere Schriften, sowie in den Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel.

E. von Meyer.

Schratten.

Mäandrisch verlaufende, durch die auflösende Tätigkeit des Meteorwassers auf Kalkoberflächen hervorgerufene Vertiefungen (vgl. den Artikel „Verwitterung").

Schriftgranit.

Eine Verwachsung von Quarz und Feldspat, bei der auf dem Querbruch der dunkle, durchsichtige Quarz sich ähnlich arabischen Schriftzeichen von dem hellen undurchsichtigen Feldspat abhebt.

Schrumpfungstheorie.

Die Theorie, welche die Entstehung der Gebirge durch die Schrumpfung des sich abkühlenden Erdkerns erklärt (vgl. den Artikel „Gebirgsbildung").

Schultze
Johann Heinrich.

Geboren am 12. Mai 1687, in Coblitz gestorben 1744. Er promovierte 1717 in Halle, wurde 1720 Professor der Medizin und der griechischen und arabischen Sprache in Altorf, später in Halle. Er machte chemische Experimente und wurde hierbei durch Zufall der Entdecker der Lichtempfindlichkeit der Silbersalze.

Literatur. ***Eder**, Geschichte der Photographie, Seite 50. Halle 1905.*

E. Drude.

Schultze
Max Johann Sigismund.

Geboren am 25. März 1825 in Freiburg, gestorben am 26. Januar 1874 in Bonn a. Rh. Studierte hauptsächlich in Greifswald bei seinem Vater Karl August Sigismund Schultze, dessen Prosektor er auch von 1850 bis 1854 war, sowie auch in Berlin unter Joh. Müller Bruck und Schlemm. Er promovierte 1849 und folgte, nachdem er in Greifswald habilitiert war, 1854 einem Ruf als Professor nach Halle. 1859 siedelte er als Direktor des anatomischen Instituts nach Bonn über, wo er trotz ehrenvoller Berufungen bis zu seinem Tode verblieb. Schultze war einer der bahnbrechenden Meister der Anatomie und der Histologie. Nach zwei Richtungen hat er besonders fördernd und fruchtbar gewirkt, einmal in der Erforschung der elementaren Lebenserscheinungen und einer damit verbundenen Neugestaltung des Zellbegriffs — er sprach zuerst aus, daß die Membran nicht notwendig zu dem Begriff „Zelle" gehöre —, und dann in der außerordentlichen Vervollkommnung der Forschungsmethode. Er ist es gewesen, der die Technik durch ausgedehnte zielbewußte Anwendung von chemischen Hilfsmitteln und Verfahrungsweisen so bereichert hat, daß der gewaltige Aufschwung, den die mikroskopische Forschung in neuerer Zeit gewonnen hat, hauptsächlich (s. a. die Biographie Remak) auf seinen Einfluß zurückzuführen ist.

Seine Hauptleistungen betreffen die genauere Kenntnis der Nervenendigungen, besonders des Baues der Retina, die Einführung der Ueberosmiumsäure, die Konstruktion der „Wärmetische" und die Einführung der sogenannten physiologischen Flüssigkeiten.

Seine hauptsächlichsten Arbeiten sind: „Monographie der Turbellarien", Greifswald 1851, „Ueber den Organismus der Polythalamien", Leipzig 1854, „Ueber Muskelkörperchen und das, was man eine Zelle zu nennen habe", 1861, „Beiträge zur Kenntnis der Landplanarien", Halle 1857, „Zur Kenntnis der elektrischen Organe der Fische", Halle 1858, „Die Hyalonemen", Bonn 1860. „Das Protoplasma der Rhizopoden und der Pflanzenzellen", Leipzig 1863, „Observationes de ovorum ranarum segmentatione", Bonn 1863, „Ueber den gelben Fleck der Retina", Bonn 1867, „Untersuchungen über die zusammengesetzten Augen der Krebse und Insekten", Bonn 1868, „Observationes de structura cellularum fibrarumque nervorum", Bonn 1868. Er begründete 1865 das „Archiv für mikroskopische Anatomie" (fortgesetzt von La Valette Saint-George und Waldeyer).

Literatur. ***Waldeyer**, im Biographischen Lexikon ed. Hirsch und Gurlt, V, 304. — **Carus**, Geschichte der Zoologie. München 1872. — **Burckhardt**, Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Schutzmittel der Pflanzen.

Definition. I. Schutzmittel an den Blättern. A. Gegen Tiere und Menschen. 1. Haarbildungen. 2. Nadelbildungen. 3. Einlagerung von Kieselsäure. 4. Bildung von Giften. B. Gegen zu starke Verdunstung und die Gefahr der Vertrocknung. 1. Schutzmittel auf der Blattunterseite. a) Regulierung der Spaltöffnungen. b) Geringe Anlage enger Spaltöffnungen. c) Besondere Lage derselben; Wachsverschluß. d) Mangrovebäume. e) Einrollen der Blätter.

f) Aufrichten der Blattspreiten. 2. Schutzmittel auf der Blattoberseite. a) Fehlen der Spaltöffnungen, besondere Lage derselben. b) Einseitige Verdickung der Zellmembranen des Oberhautgewebes. c) Cuticula und Wachsüberzug. d) Wollhaare und Spreuschuppen. 3. Auffangen von Wasser durch die Blätter. a) Bildung von Blattrosetten. b) Verwachsen gegenständiger Blätter zu Wasserschalen. c) Blattbecher bei Platycerium. d) Wassersäcke bei Frullania. e) Urnenförmige Behälter bei Dischidia. 4. Schutz durch Reduktion der Blattflächen. 5. Schutz durch Fehlen der Blätter und Blattstiele. 6. Schutz durch Bildung walzenförmig gestalteter Blätter. 7. Polsterbildung der Pflanzen. C. Gegen zu große Feuchtigkeit der Luft. 1. Schlafbewegungen der Blätter. 2. Bildung von Wasserspalten, Durchlässigkeit des Oberhautgewebes der Blätter. D. Gegen Ernährungsstörungen. 1. Gegen zu starkes Sonnenlicht. a) Bewegung der Chloroplasten. b) Bewegung der Blätter (Kompaßpflanzen). 2. Gegen zu schwaches Sonnenlicht. a) Ausbildung größerer Blätter bei Schattenpflanzen. b) Eigenartige Konstruktion der assimilierenden Zellen (Schistostega). 3. Gegen Ersticken. II. Schutzmittel an den Stämmen. A. Gegen Tierfraß. 1. Haarbildungen. 2. Dornen. 3. Kristalle. 4. Gifte. 5. Klebriger Saft. 6. Einlagerung von Kieselsäure. B. Gegen pflanzliche Feinde. Krebs der Apfelbäume. C. Gegen ungünstige klimatische und Bodenverhältnisse. 1. Schutz gegen zu starke Verdunstung. a) Kork- und Rindenbildung. b) Wachsüberzüge. c) Leimzotten, Wollhaare. III. Schutzmittel an den Wurzeln. A. Gegen Ernährungsstörungen. 1. Wurzelhaube. 2. Korkbildung. B. Gegen Tierfraß. Gifte, Bitterstoffe. C. Gegen Ersticken. Hügelpflanzung, Atemwurzeln. D. Gegen zu starke Verdunstung. Velamen bei Orchideen. IV. Schutzmittel an den Blüten gegen die Unbilden der Witterung. Schließen der Blumenblätter bei niederer Temperatur und bei Dunkelheit. V. Schutzmittel an den Samen und Früchten. A. Gegen Verkümmerung. Lockmittel der Früchte für Tiere, Schleudervorrichtungen, Samenflügel, Haarbildungen. B. Gegen unliebsame Verbreitung der Samen. Zusammenlegen des Pappus. C. Gegen Verbrennungen durch chemische Stoffe. Korkbildung. D. Gegen die Angriffe von Pilzen. Korkbildung. E. Gegen Tierfraß. Gifte. F. Gegen zu starke Verdunstung des Wassers aus den Früchten. Wachs, Cuticula.

Definition. Unter Schutzmitteln der Pflanzen kann man zweierlei verstehen:

a) Auf der einen Seite sind es Mittel, welche der Mensch von sich aus anwendet, um die Pflanzenwelt vor den Angriffen von Tieren und Pflanzen oder vor äußeren schädigenden Einwirkungen zu schützen. Zur Erreichung dieses Zweckes stehen ihm entweder mechanische oder chemische Mittel zu Gebote. Zu den ersteren gehören z. B. die künstliche Beschattung der Pflanzen, das Anbringen von Leimringen an Baumstämmen, die Umfriedigung eines Kulturlandes mit Zäunen oder lebenden Hecken etc. Chemische Mittel sind die Kupferkalk- und Kupfersodabrühen, die Tabaklaugen, die Petroleumemulsionen, der Schwefel und Schwefelkohlenstoff, die Seifen-Quassiabrühe usw. Mit der Aufgabe, derartige alte und neue Schutzmittel auf ihren Wert oder ihre praktische Anwendung zu prüfen, sind die zahlreichen Pflanzenschutzstationen in allen Kulturländern der Erde eifrig beschäftigt. Von den eben erwähnten Schutzmitteln der Pflanzen, die man wohl auch Bekämpfungsmittel genannt hat, soll an dieser Stelle nicht weiter die Rede sein.

b) Vielmehr sollen im folgenden nur die Schutzmittel der Pflanzen im engeren Sinne des Wortes besprochen werden. Unter solchen versteht man entweder durch anatomische Veränderungen des Pflanzenkörpers von der Pflanzenwelt selbst erzeugte Gebilde, oder von ihr geschaffene und im Pflanzenkörper abgelagerte Stoffe oder sonstige, auf physiologischen Einflüssen beruhende, durch eigenartige Orientierungsbewegungen verursachte Veränderungen der Pflanzenteile. Alle diese Schutzmittel haben den Zweck, die Gefahren, welche den Pflanzen, sei es durch Menschen oder Tiere, sei es durch Feinde aus dem eigenen Reiche oder durch ungünstige klimatische und Bodenverhältnisse drohen, von sich nach Möglichkeit abzuwenden, wodurch ihre Existenz gesichert wird.

Ueberblickt man nach diesen drei Gesichtspunkten die Schutzmittel der Pflanzen, so ist man erstaunt, in wie mannigfaltiger Weise und wie zweckentsprechend sie von der Pflanzenwelt ausgebildet sind. Um aber bei dieser Mannigfaltigkeit der Schutzmittel eine klare Uebersicht über sie zu erlangen, wollen wir sie und ihren Zweck an den Blättern, Stämmen, Wurzeln, Blüten, Früchten und Samen kurz betrachten.

I. Schutzmittel an den Blättern.

A. Gegen Tiere und Menschen.

Bekanntlich haben die Blätter im allgemeinen, abgesehen von manchen Hochblättern, die als Schauapparate dienen, eine doppelte Funktion zu erfüllen: sie sind sowohl Assimilations-, als auch Transpirationsorgane (vgl. hierzu den Artikel „Blatt", Bd. II). Also sind sie die wichtigsten Teile der Pflanze, da sie allein imstande sind, aus der Kohlensäure der Luft die Ausgangsmaterialien aller kohlenstoffhaltigen Stoffe der Pflanze zu bilden und zugleich die Zufuhr anorganischer Stoffe der Hauptsache nach zu regulieren. Deshalb werden wir auch gerade an den Blättern die mannigfaltigsten Vorrichtungen finden, die einmal das wertvolle Assimilationsgewebe

besonders vor den Angriffen durch die Tierwelt schützen sollen, dann aber auch vor klimatischen Verhältnissen, welche sowohl die Assimilation, als auch die Transpiration der Blätter ungünstig beeinflussen.

1. **Haarbildungen.** Als ein wesentliches Schutzmittel der Blätter gegen Tierfraß oder gegen eine zu starke Verdunstung sind in erster Linie die Haarbildungen zu nennen (vgl. den Artikel „Haar"). Die Haare befinden sich zum Teil auf der oberen oder unteren Blattspreite, vielfach auch auf den Blattnerven und an den Blattstielen. Die einfachsten Pflanzenhaare, die durch einseitiges Auswachsen von Oberhautzellen entstehen, sind die Borstenhaare, meist einzellige Gebilde, die kurz, steif und spitz sind und deren Innenraum gewöhnlich mit Luft angefüllt ist (Fig. 1.)

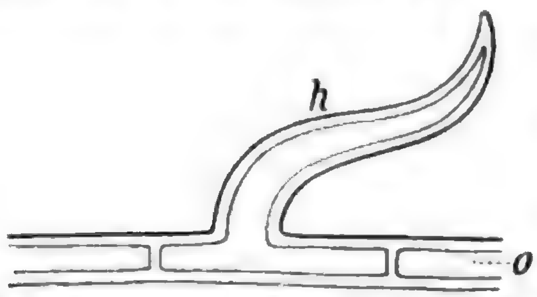


Fig. 1. Borstenhaar am Stengel und auf der Oberhaut der Blätter des Hopfens. h stark verkieseltes Haar, o Oberhautzellen des Blattes.

Mit ihnen sind zahlreiche Pflanzenfamilien ausgerüstet, so namentlich Echium, Borago, Humulus, Cucurbita u. a. Vielfach sind die Haare von mehrzelliger Struktur, wie die Sternhaare, die sternförmig sich verästeln (Verbascum, Matthiola). Die dichten Wollüberzüge, wie wir sie an den Blättern des Edelweiß (Gnaphalium leontopodium) finden, bestehen aus zahlreichen, langgestreckten, gekrümmten, vielfach verzweigten und weichen Wollhaaren. Schicken sich Tiere an, Blätter, die mit den erwähnten Haaren dicht besetzt sind, zu verzehren, so dringen entweder die nadelspitzen Borsten- und Sternhaare in die Schleimhäute der Mundhöhle ein und verursachen dort großen Schmerz, oder die Wollhaare, welche sich sehr leicht vom Oberhautgewebe ablösen, bleiben in der Mundhöhle der Tiere kleben und sind letzteren dann sehr unangenehm. Deshalb lassen die Tiere bald von dem Fressen derartiger Blätter ab, womit die Pflanze ihren Zweck erreicht hat. Kräftige Schutzmittel gegen Tierfraß und Berührung durch Menschen sind manche Arten von Drüsenhaaren, so die Brennhaare der Nesselgewächse und die Drüsenhaare der Primula obconica, einer vielbegehrten Zierpflanze (Fig. 2). Die Brennhaare der Brennessel dringen mit ihrer scharfen glasähnlichen Spitze, nachdem durch die Berührung mit der Hand das an ihrer Spitze befindliche seitliche Köpf-

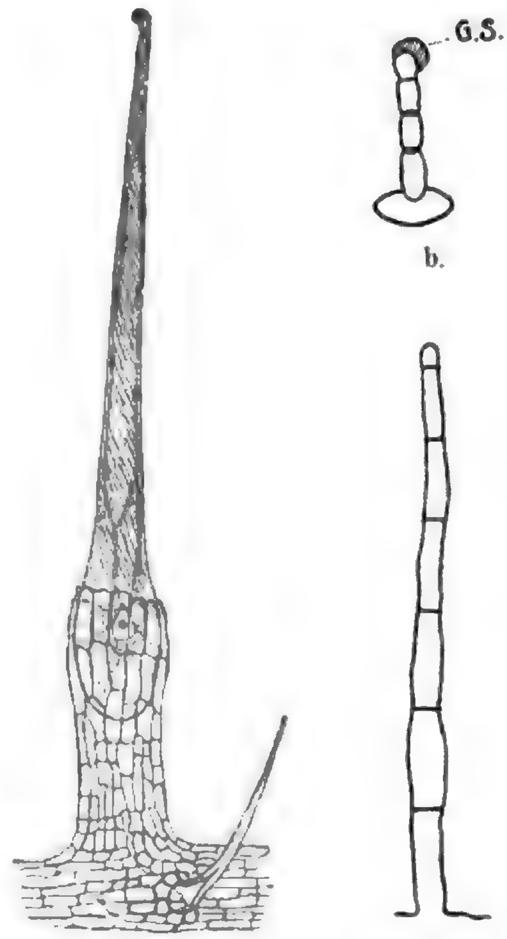


Fig. 2. a. Brennhaar der Brennessel, rechts unten verkieseltes Borstenhaar. Nach E. Strasburger. b. Drüsenhaar der Primel (Primula obconica). G.S. Giftsubstanz. c. Gliederhaar der Primel (Primula obconica).

chen abgebrochen ist, in tiefer gelegene Hautgewebe der Hand ein und entleeren dort ihren wässerigen giftigen Inhalt, der dann die bekannten Entzündungen und das Brennen verursacht. In gleicher Weise werden Personen mit weicher Haut, welche mit den Drüsenhaaren der Primula obconica in Berührung kommen, durch die an der Spitze der Haare zwischen der Zellhaut und einem feinen Häutchen (Cuticula) abgesonderte, gelblich-braune, giftige, harzähnliche Flüssigkeit affiziert.

Eine besondere Art von Haaren sind die Stacheln, welche gegen Tierfraß ein wirksames Schutzmittel sind. Namentlich die Blattstiele der Rosaceen, hier ganz abgesehen von deren Stengeln, sind mit dieser Waffe ausgestattet, die besonders gefährlich wird, wenn die spitzen Stacheln verholzt sind und deshalb ihre Umbiegsamkeit ver-

loren haben. Viele Pflanzenarten, z. B. die gemeine Distel, die Stechpalme, die Berberitze, die Aloë, die Ananasgewächse u. a. sind dadurch ausgezeichnet, daß ihre Blattränder scharf gesägt, und die Zähne hart und dornig spitz sind. Würden solche Blätter, die mit Stacheln besetzt oder mit diesen dornig-spitzen Blattzähnen versehen sind, von den Tieren gefressen werden, so würden sie sich, wie die Borstenhaare, im Schlund oder im Magen der Tiere festhaken und große Schmerzen verursachen, weshalb solche Pflanzen lieber gemieden werden.

2. Nadelbildungen. In den Blättern der sogenannten Schneckenpflanzen, zu denen z. B. der Salat und auch die Reben gehören, bilden sich innerhalb der Zellen zahlreiche, feine Kristallnadeln, die aus oxalsaurem Kalk bestehen. Gewöhnlich liegen diese Nadeln zu Bündeln (Raphiden) vereint und füllen dann fast den ganzen Zellraum aus (Fig. 3). Sobald aber die Zellen, etwa durch

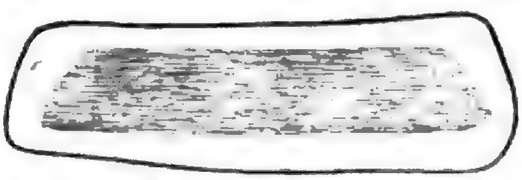


Fig. 3. Ein Büschel von Kristallnadeln in einer Zelle des Rebstockes.

das Fressen der Schnecken geöffnet werden, zerstreuen sich die an den beiden Enden scharf zugespitzten Nadeln und bohren sich in die weichen Freßwerkzeuge der Tiere ein, was letztere so schmerzt, daß sie bald mit dem Fressen solcher Blätter, in denen die Kristallnadeln kräftig ausgebildet sind, aufhören.

3. Einlagerung von Kieselsäure in den Blatträndern. Besonders die Blätter mancher Gramineen und Irideen sind an ihrem Rande so scharf, daß man sich bei ihrer Berührung wie mit einem scharfen Messer verletzen kann. Die Härte und Schärfe dieser Blattränder wird dadurch bewirkt, daß sich an diesen Stellen eine große Menge Kieselsäure in den Zellmembranen abgelagert hat.

4. Bildung von Giften. Sehr wirksam und die Tiere abschreckend sind die zahlreichen giftigen Stoffe, welche von sehr vielen Pflanzen, den sogenannten Giftpflanzen, gebildet werden. Man kann von diesen Giften zwei Arten unterscheiden: 1. solche, welche im Augenblick des Fressens aus den geöffneten Zellen der Blätter hervorquellen und den Feind überschütten und 2. solche, welche erst im Magen der Tiere wirken. Gifte der ersten Art haben die Blätter der Wolfsmilcharten, die in besonderen Behältern unter Druck einen milchigweißen Saft besitzen, das Schöllkraut (Chelidonium) mit gelbem Saft, der Giftlattich (Lactuca virosa), der gern von Ameisen und Schnecken heimgesucht wird. Giftstoffe, die erst im Magen der Tiere wirken, sind z. B. das Coniin im Schierling, das Nikotin im Tabak, das Hyoscyamin im Bilsenkraut, das Aconitin im Eisenhut usw. Wir werden später sehen, daß derartige Alkaloïde sich auch in anderen Pflanzenteilen, der Rinde, den Samenkapseln, den Früchten und Wurzeln vieler Pflanzen vorfinden und dort ebenfalls als kräftige Schutzmittel gegen Tierfraß wirken.

B. Gegen zu starke Verdunstung und die Gefahr der Vertrocknung.

1. Schutzmittel auf der Blattunterseite. Die bisher beschriebenen Schutzmittel tragen gewiß in vielen Fällen zur Erhaltung der Blätter bei und sind deshalb für dieselben äußerst wertvoll, aber sie können doch nicht die Blätter in ihren wichtigsten Funktionen als Assimilations- und Transpirationsorgane vor Schaden bewahren. Deshalb mußte die Natur von sich aus Vorkehrungen treffen, welche den Blättern gestatten, auch unter ungünstigen äußeren Verhältnissen ihre beiden, ihnen zugewiesenen Arbeiten vollführen zu können. Es ist das Wasser, welches als der wichtigste Stoff zur Unterhaltung der Ernährungs- und Wachstumsvorgänge im Pflanzenkörper zu betrachten ist. Ist an ihm Mangel vorhanden, so verlieren die Blätter ihre Straffheit (Turgor), sie hängen welk herab und können in diesem Zustande die Umwandlung der aus der Luft aufgenommenen Kohlensäure in Stärke und Sauerstoff (Assimilation) nicht mehr ausführen. Die Blätter sind natürlich in bezug auf die Wasserzufuhr zunächst und direkt von der Arbeitsleistung der das Wasser aufnehmenden und weiterleitenden Wurzeln abhängig. Unter normalen Verhältnissen führen diese durch den Wurzeldruck und durch den von den Blättern eingeleiteten Transpirationsstrom den letzteren genügende Mengen Wasser zu. Ein Ueberschuß daran wird durch die Millionen kleiner Spaltöffnungen, welche sich gewöhnlich auf der Blattunterseite befinden, gasförmig an die umgebende Luft abgegeben, während die mit dem Wasser mitgeführten wertvollen Nährsalze in den Pflanzen zurückbleiben.

Die Assimilation ist im Pflanzenleben der wichtigste Vorgang, dem alles Leben auf der Erde, auch das der Menschen und Tiere, seine Existenz verdankt. Aber dieser Vorgang ist, wie wir gesehen haben, im letzten Grunde doch abhängig von der richtigen Regulierung der Transpiration durch die Blätter. Infolgedessen mußten sich die

Blätter, namentlich im Hinblick darauf, daß die Pflanzen als festgewurzelte, an ihren Standort festgebannte Organismen, die sich äußeren ungünstigen Verhältnissen nicht durch die Flucht entziehen und bessere Lebensbedingungen aufsuchen können, ihrer Umgebung anpassen. Zwar breiten die Blätter ihre Spreiten im Luftmeer so aus, daß die Sonnenstrahlen sie senkrecht durchfluten können, zwar suchen sie, falls sie aus der günstigen Lichtlage durch irgendwelche Umstände herausgebracht sind, diese durch komplizierte Orientierungsbewegungen wieder auf, aber was nützt ihnen das alles, wenn sie Mangel an Wasser haben und sich deshalb nicht mehr normal zu ernähren imstande sind!

In der mannigfachsten Weise hat darum die Natur gerade die Blätter mit Mitteln ausgestattet, welche sie gegen eine zu starke Verdunstung oder gar Vertrocknung schützen und die Existenz des ganzen Pflanzenkörpers selbst unter ungünstigen klimatischen und Bodenverhältnissen sichern sollen. Wohl hat sie manche Pflanzenarten, wie die Selaginellen (Bärlappgewächse) und auch die an kahlen Gebirgsfelsen und auf der Rinde der Baumstämme lebenden Flechten mit einem Plasma versehen, welches auch in lufttrockenem Zustande, wie das Plasma der Getreidekörner und vieler Samen, auf längere Zeit hindurch lebensfähig bleibt. Aber solche Beispiele sind in der Pflanzenwelt doch sehr selten. Für die meisten lebenden grünen Pflanzen bedeutet das Herabsinken ihres Wassergehaltes unter ein gewisses Mindestmaß soviel wie die Vernichtung ihres Lebens. Sehen wir deshalb nach, auf welche Weise und durch welche Vorrichtungen sich die Blätter gegen eine zu starke Verdunstung und gegen die Gefahr der Vertrocknung schützen, um dem geschilderten verhängnisvollen Zustande zu entgehen.

a) Regulierung der Spaltöffnungen. Die Größe der Verdunstung des Wassers aus den Blättern, welche, wie schon oben erwähnt wurde, durch die Spaltöffnungen auf der Unterseite der Blätter erfolgt, ist von verschiedenen äußeren Faktoren abhängig: 1. von der Trockenheit der die Blätter umgebenden Luft, 2. von der Bewegung, 3. von der höheren Temperatur derselben und 4. von der stärkeren Belichtung der Blätter. Da ist es nun für die Blätter sehr wichtig, daß sie die Weite der Spaltöffnungen (vgl. Fig. 9) von sich aus regulieren können. Nimmt die Verdunstung infolge der eben genannten äußeren Faktoren zu stark zu, so werden die beiden Schließzellen, welche zwischen sich die Spaltöffnung bilden, in verschiedenen Graden schlaff und welk und bedingen dadurch einen größeren oder geringeren Verschluß dieser Oeffnung. So kann es vorkommen, daß zu gewissen Zeiten der Spalt zwischen den Schließzellen vollständig geschlossen wird, wodurch dann die Transpiration auf ein Mindestmaß herabgedrückt oder ganz aufgehoben wird. Ist umgekehrt ein großer Wasservorrat in den Blättern vorhanden, so werden die Schließzellen straff (turgescent), und der Spalt öffnet sich weit, so daß nunmehr eine starke Verdunstung des Wassers aus den Blättern erfolgen kann.

b) Geringe Anlage enger Spaltöffnungen. Aber diese Selbstregulierung der Spaltöffnungen reicht bei weitem nicht aus, um die Blätter vor der Gefahr zu starker Verdunstung und des Vertrocknens zu schützen, namentlich nicht bei Pflanzen, welche in Ländern mit heißem und trockenem Klima oder auf wasserdurchlässigem Boden in den gemäßigten Zonen der Erde wachsen. Hier heißt es für die Pflanzen: mit dem Wasser äußerst sparsam umzugehen! Um deshalb die Transpiration möglichst zu verringern, legen diese Pflanzen in ihren Blättern nur wenige und dazu noch enge Spaltöffnungen an.

c) Besondere Lage und Wachsverschluß der Spaltöffnungen. Andere Pflanzen helfen sich dadurch, daß sie die Spaltöffnungen an den Blättern in Aushöhlungen (Oleander) verlegen, die außerdem noch mit vielen feinen und gewundenen Haaren ausgekleidet sind. Auch die Kiefern, welche meist auf trockenem, sandigem Boden wachsen, haben ihre Spaltöffnungen reihenweise in Vertiefungen. Derartige Vertiefungen sind besonders schön bei der Aloë zu sehen. Wieder andere Pflanzen bewirken einen größeren Verschluß der Spaltöffnungen dadurch, daß sie dieselben mit einer Wachsschicht verstopfen.

d) Mangrovebäume. Es wird merkwürdig klingen, daß auch manche Pflanzenarten, wie die sogenannten Mangrovebäume, welche im Meeresschlamme Westindiens große Wälder bilden, dennoch Schutzmittel gegen zu starke Verdunstung des Wassers aus den Blättern gebildet haben. Die Nützlichkeit der Schutzvorrichtung wird aber sofort klar, wenn man daran denkt, daß die Bäume im Meereswasser wachsen. Bei ihnen ist die Wasseraufnahme infolge des Salzgehaltes des Meerwassers eine erschwerte. Durch die verringerte Transpiration sorgen sie auch dafür, daß nicht zuviel Salz in die Pflanze gelangt, welches ihrem Leben schädlich sein würde.

e) Einrollen der Blattspreite. Auf ganz eigenartige Weise schützen sich manche Gräser (Stipa-Arten, Festuca) gegen zu starke Transpiration. Ist die Luft feucht

genug, so breiten sie ihre Spreiten weit aus. Sobald aber Mangel an Wasser eintritt, rollen sie die Spreiten mit Hilfe von Scharnieren zu einer Röhre ein, so daß die Spaltöffnungen, welche sich bei diesen Pflanzen ausnahmsweise auf der Oberseite der Blätter befinden, innerhalb der Röhre zu liegen kommen, während die Unterseiten der Blätter die Außenseite der Röhre darstellen (Fig. 4). Auf diese Weise findet

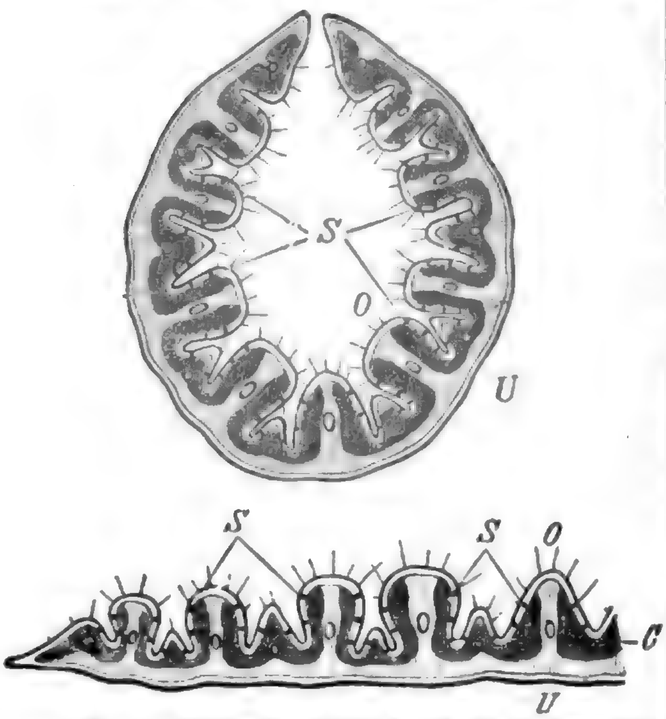


Fig. 4. Blattquerschnitte durch ein Pfriemengras (Stipa capillata). Oben ein Blatt im eingerollten Zustand, unten ein Teil des offenen Blattes. U Unterseite des Blattes, frei von Spaltöffnungen, O Oberseite des Blattes mit Spaltöffnungen S, C Gewebe mit grüngefärbten Körnern. 30 fache Vergrößerung. Nach Kerner von Marilaun.

zwar immerhin eine schwache Transpiration durch die Spaltöffnungen statt, aber der Wassergehalt innerhalb der Blattröhre nimmt zu, wodurch allmählich die Transpiration des Blattes verringert wird.

f) Aufrichten der Blattspreiten. Um eine zu starke Verdunstung der Blätter durch die heiße Mittagssonne zu vermeiden, schlagen sich die Fiederblättchen der Akazien (Robinia) senkrecht hoch und klappen aneinander, so daß die Sonnenstrahlen an ihnen vorbeigehen.

2. Schutzmittel auf der Blattoberseite.

a) Fehlen der Spaltöffnungen. Nicht nur auf der Blattunterseite, sondern auch auf dessen Oberseite sind Schutzmittel gegen eine zu starke Verdunstung des Wassers aus den Blättern angebracht. Im allgemeinen fehlen die Spaltöffnungen auf der Blattoberseite. Eine direkte Belichtung derselben kann also keine so starke Transpiration hervorrufen, wie sie sein würde, wenn sich auch dort Spaltöffnungen befinden würden.

b) Einseitige Verdickung der Zellmembranen. Um die Transpiration der Blätter auf der Oberseite möglichst zu verhüten, sind die Zellwände des Oberhautgewebes nach der Seite hin, wo das Blatt mit der Außenwelt in Berührung kommt, vielfach stark verdickt.

c) Cuticula und Wachsüberzug. Außerdem lagert auf diesen äußeren Zellwänden als Schutzmittel ein feines, wasserundurchlässiges Häutchen, die schon erwähnte Cuticula, und bei vielen Pflanzen (Echeveria, Eucalyptus globolus, Secale cereale u. a.), deren Blätter ein blaugrünes oder bereiftes Aussehen haben, noch eine verschieden gestaltete, bald punktförmige, bald netzartig verbundene, bald stäbchenförmige Wachsschicht.

d) Wollhaare und Spreuschuppen. Die Wollhaare, die wir schon als Schutzmittel gegen Tierfraß kennen gelernt haben, sind zugleich ein starker Schutz gegen eine starke Verdunstung, ebenso die Spreuschuppen, die man besonders schön an den jungen Blättern der Farnkräuter sehen kann.

3. Auffangen von Wasser durch die Blätter.

a) Bildung von Blattrosetten. Sowohl tropische, als auch einheimische Pflanzen können sich durch ganz merkwürdige Vorrichtungen an den Blättern vor dem Vertrocknen und Absterben schützen. Die Blätter der Bromeliaceen bilden an ihrem Grunde krugförmige Blattrosetten, in denen sich zur Regenzeit Wasser ansammelt, obwohl die Blätter nur dicht aneinandergelegt, also nicht miteinander verwachsen sind. Diese Erscheinung kann man in jedem Gewächshaus eines Gärtners beobachten.

b) Bildung von Wasserschalen. Von unseren einheimischen Pflanzen ist die Weberkarde bekannt, deren gegenüberstehende Blätter am Grunde miteinander verwachsen sind und die auf diese Weise Schalen mit 4 bis 5 cm Randhöhe bilden, in denen sich ebenfalls das Regenwasser in beträchtlicher Menge ansammelt, da die Pflanzen häufig ein Dutzend solcher Schalen besitzen.

c) Bei dem Farnkraut Platycerium schlagen sich die großen Blätter zu einem Becher zusammen, in dem sich herabgefallenes Laub ansammelt. Letzteres bildet in dem Becher eine wasserhaltende Humusschicht.

d) Auf der Rückseite der Blätter des

Lebermooses Frullania Tamarisci, das in unseren Wäldern an Buchen nicht selten vorkommt, befinden sich kleine Wassersäcke, die sich zur Regenzeit mit Wasser füllen (Fig. 5).

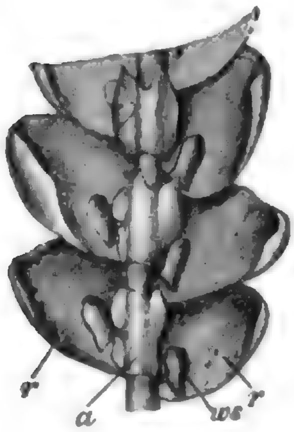


Fig. 5. Lebermoos Frullania Tamarisci. Von unten gesehen. r Rückenblatt, ws als Wassersack ausgebildeter Unterlappen des Rückenblattes. 36-fache Vergrößerung. Nach H. Schenck.

ε) Endlich bilden die Blätter einer tropischen Pflanzenart (Dischidia Rafflesiana) urnenförmige Behälter, die nur eine schmale Eingangsöffnung belassen. In ihnen sammelt sich zur Regenzeit ebenfalls das Wasser an, und die Pflanze schickt dann in diese Behälter ihre Wurzeln, die sich darin verzweigen.

Alle die genannten Vorrichtungen dieser Pflanzen, die man als Zisternengewächse bezeichnet, haben den Zweck, Wasser zur Regenzeit aufzuspeichern. In der Zeit der Not, d. h. in der regenlosen Zeit, wird dieses dann allmählich von der Pflanze durch die Blätter, oder wie bei Dischidia, von den Wurzeln aufgenommen und von ihr zur Erhaltung ihres Lebens in wasserarmer Zeit benutzt.

4. Schutz durch Reduktion der Blattflächen. Es leuchtet ein, daß durch eine Verkleinerung der transpirierenden Blattflächen die Verdunstung des Wassers aus den Blättern eine geringere werden muß als bei großen Blattflächen. Derartige verkleinerte Blätter zeigen der Sadebaum, die Zypressen, der Lebensbaum u. a. Eine Ehrenpreisart (Veronica cupressoides; Fig. 6) mit zypressenähnlichen Blättern kommt in Neuseeland vor. Auch die einheimischen Ginsterarten, welche von weitem wie Binsen aussehen, besitzen verkleinerte Blätter. Desgleichen sind die Nadeln der Coniferen hierher zu zählen.

5. Schutz durch Fehlen der Blätter und Blattstiele. Noch mehr wird die Transpiration der Pflanzen vermindert, wenn ihnen die Blätter vollständig fehlen und die verbreiterten Blattstiele Assimilationsorgane werden, wie z. B. bei manchen Akazienarten Australiens (Acacia marginata). Es kann jedoch auch vorkommen, daß selbst die Blattstiele fehlen. In diesem Falle wird die Transpiration auf ein Minimum herabgesetzt, und der Stamm selbst wird Assimilationsorgan, so z. B. bei den Kugel- und Säulenkakteen, den Opuntien und vielen tropischen Wolfsmilchgewächsen. Dadurch, daß manche Kakteen sich kugelförmig ge-



Fig. 6. Ehrenpreis mit zypressenähnlichen Blättern von Neuseeland. Aus Schimper, Pflanzengeographie.

stalten, nehmen sie den größten Inhalt, aber zu diesem die kleinste Oberfläche ein, weshalb sie als Wasserbehälter sehr geeignet sind. Eine Kugelkaktee verdunstet nur den 6000-sten Teil derjenigen Wassermenge, die eine gleich schwere Aristolochia abgibt. Die blattlosen Pflanzen, welche meist auf recht trockenen Standorten in regenarmen Gegenden wachsen, haben durch diese Einrichtungen den großen Vorteil, daß sie sich trotz langanhaltender Dürre doch am Leben erhalten können.

6. Schutz durch Bildung walzenförmig gestalteter Blätter. Den gleichen Vorteil verringerter Transpiration finden wir auch bei den sogenannten Fettpflanzen (Succulenten), z. B. beim Hauswurz (Sempervivum tectorum) und der Fetthenne (Sedum). Bei ihnen sind die Blätter fleischig, dick, walzenförmig, und bilden als solche Wasserbehälter. Beim Eiskraut (Mesembryanthemum crystallinum) sind die dickfleischigen Blätter zur weiteren Verringerung der Transpiration außerdem mit einer Wachsschicht bekleidet.

7. Polsterbildung der Pflanzen. Dadurch, daß manche Pflanzen sich zu dichten Polstern vereinigen, kann das Wasser zwischen den eng stehenden Stengeln und Blättern nur schwer verdunsten. Es bildet

sich deshalb zwischen ihnen ein wassergesättigter Raum, der die Transpiration aus den Blättern stark vermindert. Sehr gute Beispiele für die Polsterbildung bieten unsere einheimischen Laubmoose, und namentlich manche Alpenpflanzen in der Felsregion über 4000 m Meereshöhe, wo die Mannsschildarten (Androsace) noch in-

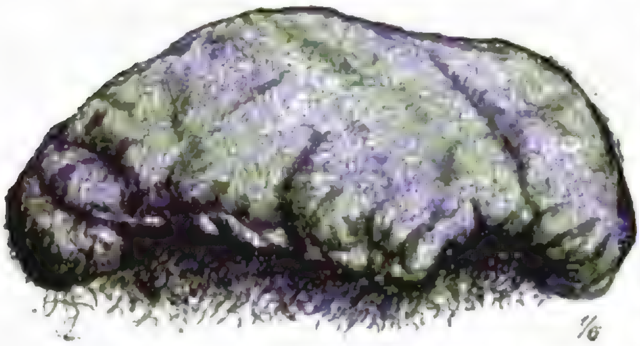


Fig. 7. Raoulia mammillaria von Neuseeland. Polsterförmiger Zusammenschluß der Einzelpflanzen. Aus Schimper, Pflanzengeographie.

folge der Polsterbildung ihr Dasein fristen können. Ein sehr schönes Beispiel für den polsterförmigen Zusammenschluß der Einzelpflanzen bildet eine solche von Neuseeland (Raoulia mammillaria, Fig. 7).

C. Gegen zu große Feuchtigkeit der Luft.

Sobald für eine Pflanze die Feuchtigkeitsverhältnisse der Luft oder des Bodens nach der Richtung hin ungünstig werden, daß ihr zu ihrem Dasein zu viel Wasser zu Gebote steht, sucht sie auf umgekehrte Weise, als wir es eben erörtert haben, eine Regulierung der Wasserverhältnisse herbeizuführen. Sie wird also auf den Zellen des Oberhautgewebes keine oder nur eine sehr schwache Cuticula ausbilden, sie wird die Spaltöffnungen nicht in Höhlungen oder Vertiefungen anlegen, sondern sie erzeugt sie auf vorspringenden Punkten der Blattober- oder Unterseite, damit nun die Verdunstung kräftig einsetzen kann. Auch dunkle Farbstoffe, die in die Zellen der Oberhaut des Blattes gelegt werden, ermöglichen infolge der leichteren Aufnahme der Wärmestrahlen eine Erhöhung der Transpiration. Trotz alledem müßte dieselbe doch in dem Augenblick aufhören, wenn die die Pflanze umgebende Luft wassergesättigt ist. Das wäre jedoch für die Pflanze von großem Nachteil, weil durch das Aufhören des Transpirationsstromes keine neuen Nährstoffe mehr in das Blatt geschafft werden, und dadurch also die Assimilation gestört wird. Deshalb finden wir an den Blättern Schutzvorrichtungen, welche es ihnen gestatten, trotz der sie umgebenden wassergesättigten Luft doch noch Wasser abzugeben.

1. Schlafbewegungen der Blätter. Die Blätter unserer gewöhnlichen Gartenbohnen, aber auch die des Klees und des Sauerklees zeigen uns, wie die Pflanzenwelt diesen Zweck erreicht hat. Am Tag sind die Blattspreiten dieser Blätter auseinander gebreitet und dem Sonnenlicht in ihrer ganzen Fläche ausgesetzt; aber am Abend haben sie ihre Blätter nach unten gesenkt, sie haben die sogenannte Schlafstellung eingenommen (Fig. 8). Am nächsten Morgen erheben



Fig. 8. Bohnenblätter in Schlafstellung. a, b und c grüne Polster an den Blattstielen. Die Blätter und Polster sind nach abwärts gerichtet. Nach J. Sachs.

sich ihre Blätter wieder in die normale Lichtlage, sie nehmen Tagesstellung ein. Die Auf- und Abwärtsbewegungen werden dadurch hervorgebracht, daß die kleinen grünen Polster, welche sich an jedem Stielchen der 3 Blätter befinden, gegen Abend straffer werden, aber so, daß in der oberen Hälfte sich mehr Wasser ansammelt als in der unteren, wodurch die Blattspreiten nach unten bewegt werden. Am nächsten Morgen gleicht sich die verschiedene Spannung in den Polsterhälften wieder aus, wodurch die Blätter in ihre normale Lage zurückkehren. Nach Stahl ist der Zweck dieser Schlafstellung offenbar darin zu erblicken, daß bei der Abwärtsstellung der Blätter die Taubildung an ihnen während der Nacht verringert, und dadurch die Verdunstung aus den Blättern wesentlich vergrößert wird.

2. Bildung von Wasserspalten. Durchlässigkeit des Oberhautgewebes der Blätter. Wenn man an einem frühen Sommermorgen die Blätter der Schafgarbe (Achillea), der Reben (Vitis), der Kapuzinerkresse (Tropaeolum), des Mais (Zea) und anderer Pflanzen betrachtet, so sieht man an jedem Zähnchen der Blätter oder beim Mais an deren Spitzen je ein rundes Tröpfchen hängen. Anfänglich glaubt man, daß sich an diesen Stellen Tautropfen abgesetzt haben; wenn man aber diese Tropfen sorgfältig wegwischt, so erscheinen sie nach kurzer Zeit wieder, ein Zeichen dafür, daß sie ihren Ursprung aus dem Blatte selbst haben. An den genannten Stellen findet man entweder größere Spalten, welche man als Wasserspalten (Fig. 9) be-

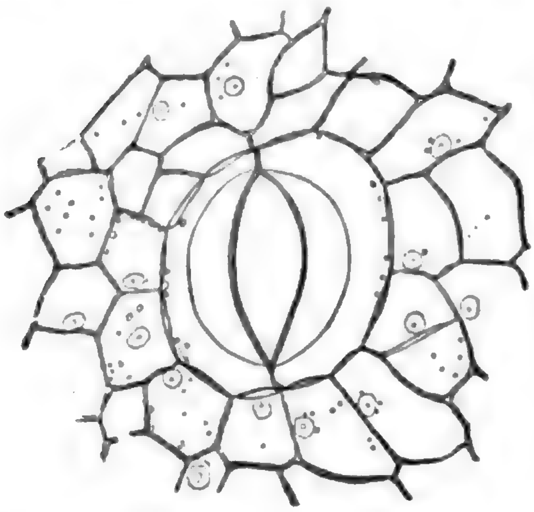


Fig. 9. Wasserspalte vom Blattrande der Kapuzinerkresse nebst den anliegenden Oberhautzellen. 240-fache Vergrößerung. Nach E. Strasburger.

zeichnet hat, und die den Spaltöffnungen gleichen, oder aber es kann das Wasser auch, wie z. B. beim Stechapfelblatt (Datura) direkt durch die Oberhaut des Blattes hinausgepreßt werden. Der Vorteil dieses Vorganges, den man Guttation nennt, beruht darauf, daß die Pflanze trotz der wassergesättigten umgebenden Luft eine Art Transpiration in größerem Stile durchführen kann, wobei allerdings auch wertvolle mineralische Stoffe der Pflanze verloren gehen. Man sieht auf solchen Blättern, namentlich bei Saxifrageen, nach dem Verdunsten der Wassertropfen eine weiße Kruste in der Größe der Tropfen.

D. Gegen Ernährungsstörungen.

1. Gegen zu starkes Sonnenlicht. a) Bewegung der Chloroplasten. Die Chlorophyllkörner, welche zur Bildung der Stärke von den Sonnenstrahlen getroffen werden müssen, sind auf eine bestimmte Lichtintensität abgestimmt und nehmen deshalb bei verschieden starkem Licht eine verschiedene Stellung zum einfallenden Sonnenstrahl ein. Diese Verhältnisse kann man sehr schön bei den Blättern der Teichlinse (Lemna) oder an Moosblättern und an den Farnvorkeimen sehen. Die verschiedene Stellung der Chlorophyllkörner bei Tag, bei Nacht und im zerstreuten Tageslicht kann man deutlich in der beigegebenen Abbildung (Fig. 10) erkennen.

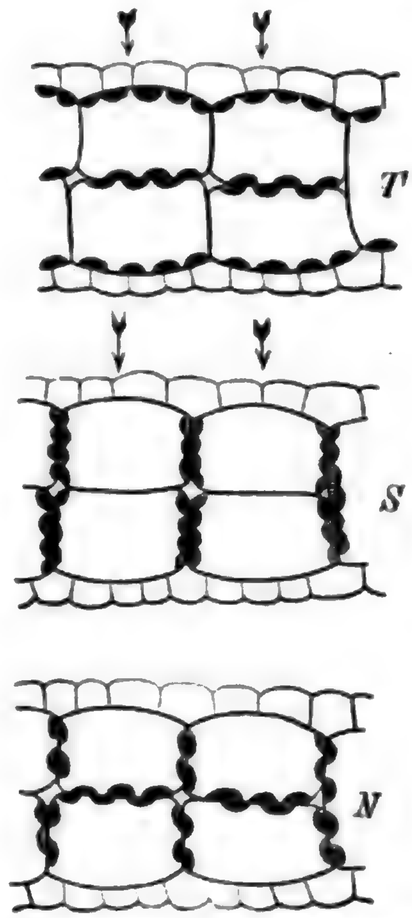


Fig. 10. Verschiedene Stellung der grüngefärbten Körner in den Zellen der Teichlinse bei verschiedener Beleuchtung. T im zerstreuten Tageslicht, S im direkten Sonnenlicht, N des Nachts. Die Pfeile geben die Richtung des einfallenden Lichtes an. Nach Stahl.

Ist das Licht zu stark, so treten die Körner an die Seitenwände der Zellen, werden auch nur seitlich vom Sonnenlicht gestreift.

Bei der Alge Mesocarpus ist der grüne Farbstoff in einer tafelförmigen rechteckigen Platte aufgespeichert. Bei zerstreutem Tageslicht bietet sie diesem ihre volle Fläche dar. Nimmt die Stärke des Lichts zu, so bildet sie mit dem einfallenden Strahl des Lichtes einen Winkel, damit dieses nicht zu stark wirkt. Bei zu grellem Licht endlich stellt sie sich so, daß ihre schmale Seite dem Lichte zugewendet ist, daß also

die Sonnenstrahlen an der größeren Fläche vorbeigehen müssen.

b) Bewegung der Blätter. Kompaßpflanzen. Gegen die Einwirkung zu starken Lichtes und damit gegen Ernährungsstörungen schützen sich manche Pflanzen dadurch, daß sie ihre Blätter von Nord nach Süd stellen und diese außerdem noch mit ihrer Blattspreite um 90° drehen. Zu diesen sogenannten Kompaßpflanzen gehört eine bei uns an Rainen und auf Schutthaufen häufig vorkommende Unkrautpflanze, der wilde Lattich (Lactuca Scariola). Durch die angegebene Stellung der Blätter gewinnt die Pflanze zwei Schutzmittel: 1. ein solches gegen zu starke Transpiration der Blätter, weil diese nicht von der heißen Mittagssonne bestrahlt werden und 2. ein Schutzmittel gegen zu starkes Licht, da ihre Spreiten nur von der Morgen- und Abendsonne beschienen werden.

2. Gegen zu schwaches Sonnenlicht. a) Ausbildung größerer Blätter. Da das Licht eine so große Bedeutung für das Leben der Pflanzen besitzt und schwaches Licht ihnen auf die Dauer zu großem Nachteil gereicht, so suchen sie durch Ausbildung größerer Blätter, also durch Anlage einer bedeutend größeren Anzahl von stärkebildenden Chlorophyllkörnern innerhalb der Zellräume die Ernährungsstörungen, wie sie zu schwaches Licht mit sich bringt, zu beseitigen (Impatiens-Arten im Waldesdunkel). Derartige Pflanzen bezeichnet man als Schattenpflanzen. Daß sie gerade im Waldesdunkel so prächtig gedeihen, während andere darin verkümmern und absterben, liegt daran, daß die einzelnen Pflanzenarten verschieden starkes Licht lieben. Die einen zeigen freudiges Wachstum, wenn sie das volle Sonnenlicht genießen, anderen ist es am wohlsten, wenn sie im Halbschatten wachsen (Plectogyne).

b) Eigenartige Bildung der chlorophyllführenden Zellen. Besonders interessant sind die Einrichtungen bei den Zellen des leuchtenden Vorkeimes eines Leuchtmooses (Schistostega osmundacea), das in manchen Höhlen des Harzes, z. B. bei Schierke, vorkommt. Die einzelnen Zellen des Moosvorkeimes sind kugelrund, in dem dem Lichte abgewendeten Teile aber etwas ausgebaucht (Fig. 10). An dieser Ausbauchung lagern nun einige Chlorophyllkörner. Der Bau dieser kugeligen Zellen wirkt genau so wie eine Linse. Gelangen die wenigen Lichtstrahlen s′, s, welche in die von der Pflanze bewohnte Höhle eindringen, an die Vorderseite der Zellkugel, so werden sie so gebrochen, daß die Chlorophyllkörner innerhalb der Zellen den Brennpunkt der Strahlen bilden. Durch die Zellengestalt wird also das schwache Licht zu einem starken gemacht, so daß Ernährungsstörungen nicht eintreten.

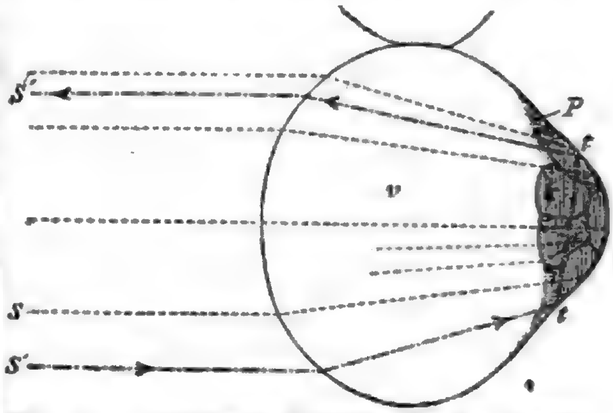


Fig. 11. Leuchtende Vorkeimzelle des Leuchtmooses (Schistostega osmundacea). s′s′ ein an der Hinterwand der kugeligen Zelle gebrochener Lichtstrahl, der im oberen Teil der Zelle aus ihr wieder heraustritt. Nach F. Noll.

3. Gegen Ersticken. Bei den schwimmenden Wasserpflanzen, z. B. der Seerose (Nymphaea) befinden sich die Spaltöffnungen der Blätter auf der der Luft zugewendeten Seite. Hierdurch ist dafür Sorge getragen, daß außer der Kohlensäure auch der Sauerstoff der Luft auf bequemem Wege in das Pflanzeninnere dringen kann. Damit ist eine Erstickungsgefahr bei denselben ausgeschlossen. Interessant ist auch die Beobachtung, daß die Blattstiele solcher Wasserpflanzen nicht vorzeitig ihr Längenwachstum einstellen, sondern erst dann, wenn die Blattfläche die Oberfläche des Wassers erreicht hat.

II. Schutzmittel an den Stämmen.

A. Gegen Tierfraß.

1. Haarbildungen. Wie an den Blättern, so bilden auch an den Stengeln mancher Pflanzen die Stacheln eine wirksame Waffe gegen Tierfraß. In dieser Hinsicht braucht nur an die Stämme der Rosen, an die Stengel der Himbeer- und Brombeersträucher erinnert zu werden.

2. Dornen. Ein ebenso wichtiges Schutzmittel gegen Tierfraß bilden die Dornen, von denen man zwei Arten unterscheidet: 1. die Dornen, welche vereinfachte Sprosse darstellen und 2. solche, welche durch die Umwandlung von Blättern entstanden sind, die sogenannten Blattdornen. Die Dornen sind hart, holzig, scharf spitz zulaufend und sind entweder einfach, wie beim Schlehdorn, Weißdorn, wilden Birnbaum usw., oder verzweigt, wie z. B. bei der vielfach in den Gärten kultivierten dreidornigen Gleditschia triacanthos. Von den Stacheln

unterscheiden sich die Stammdornen dadurch, daß sie als echte Stammgebilde Blätter tragen, wie man besonders an den Dornen des wilden Birnbaums sehen kann, während solche den Stacheln stets fehlen. Letztere kann man, wenn sie verholzt sind, sehr leicht vom Stamm abbrechen, was bei den Dornen nicht ohne weiteres möglich ist. Mit sehr schönen Dornenbüscheln sind die meisten Kakteenarten versehen. Ihnen, die auf dem Hochplateau von Mexiko große undurchdringliche Wälder bilden, sind diese Dornen ein ganz vorzügliches Schutzmittel. Wären sie damit nicht ausgerüstet, so wären sie in den dortigen regenarmen Gegenden längst verschwunden, die Tiere hätten sie wegen ihres Wassergehaltes im Stamm schon längst verzehrt.

Bei der Akazie und der Berberitze finden wir an den Stengeln echte Blattdornen, die bei ersterer Pflanze aus den beiden Nebenblättern des Laubblattes, bei der Berberitze aus dem ganzen Laubblatt gebildet sind. Deshalb sitzen die Blattdornen an der Akazie zu zweien am Grunde des gefiederten Laubblattes, während sie bei der Berberitze entweder einfach oder meist dreiteilig am Stengel vorhanden sind.

Da die Dornen so ausgezeichnete Schutzmittel der Pflanzen gegen Tierfraß sind und von der Tierwelt gemieden werden, verwendet man Pflanzen, die mit solchen ausgerüstet sind, gern zur Herstellung lebender Hecken oder von Vogelschutzgehölzen, um von den Nestern der Vögel unliebsame Gäste fernzuhalten.

3. Kristalle. Die Rinden vieler Stämme sind gegen Fraß durch Schnecken, wie z. B. die Triebe der Reben gegen das Anfressen durch Weinbergsschnecken, durch Einlagerung von spitzen nadelförmigen Kristallen aus oxalsaurem Kalk, wie die Blätter, geschützt.

4. Gifte. Auch Alkaloïde findet man in den Rinden mancher Pflanzen, wie z. B. das Chinin in der Chinarinde, das Solanin in den Kartoffelkeimen u. a. Die große Gruppe der giftigen Pilze kann an dieser Stelle auch genannt werden.

5. Klebriger Saft. Manche Pflanzen scheiden aus ihren Stengeln einen klebrigen Saft aus. Gelangen kleinere Tiere an diese Stellen, so werden sie hier festgeklebt und müssen sterben. Solche klebrigen Ausscheidungen beobachtet man bei der Pechnelke (Lychnis viscaria), die den klebrigen Stoff an dem oberen Gelenke des Stengels ausscheidet, oder bei dem Leimkraut (Silene), das von der Klebrigkeit seiner Stengel seinen Namen hat. Diese klebrigen Stoffe bilden vielfach einen wirksamen Schutz für die Blüten gegen unliebsame Gäste.

6. Einlagerung von Kieselsäure. Hierdurch sind besonders die Stengel des Schachtelhalmes (Equisetum arvense) ausgezeichnet. Durch die Einlagerung erlangen diese Pflanzen eine sehr große Festigkeit. Zu erwähnen ist auch die starke Kieselsäureeinlagerung in den Stengeln der Getreidepflanzen.

B. Gegen pflanzliche Feinde.

Daß die Pflanzenwelt auch gegen Feinde aus ihrem eigenen Reiche Schutzmittel mit gutem Erfolg anwenden kann, geht aus der Betrachtung des Kampfes, den der Erreger des Apfelbaumkrebses, Nectria ditissima, mit dem Baum führt, deutlich hervor. Die Früchte dieses Pilzes keimen meistenteils an Stellen des Apfelbaumes, wo sich Feuchtigkeit längere Zeit hindurch hält, d. h. da, wo ein Seitenzweig sich an einem Aste gebildet hat. Hier dringen die Pilzfäden in das weiche Gewebe des Astes ein, saugen es aus und töten es an dieser Stelle. Bei dem Dickenwachstum des Astes reißt hier die Rinde bis auf den Holzteil auf, so daß nach einiger Zeit eine offene Wunde entsteht. Da sondert der Apfelbaum sein Schutzmittel in der Gestalt einer Wundmasse aus, um die Wunde zu schließen. Aber der Pilz wächst mit Leichtigkeit in diese Wundmasse hinein und weiter in gesundes Gewebe des Zweiges. Da jetzt immer größere Gewebepartien abgetötet werden, so vergrößert sich damit auch die Wunde. Es kann nun zweierlei eintreten: entweder produziert der Baum, weil er recht gesund ist, so viel Wundmasse, daß die Wunde vollständig geschlossen und überwallt wird. Dann ist der Pilzfeind besiegt. In diesem Falle spricht man von einem knolligen Krebs. Ist dagegen der Baum nicht mehr so lebenskräftig, so erweitert sich die Wunde immer mehr und mehr, der Krebs ist brandig, der vom Pilz befallene Zweig muß absterben.

C. Gegen ungünstige klimatische und Bodenverhältnisse.

1. Schutzmittel gegen zu starke Verdunstung. Der Stamm der Pflanze hat die doppelte Aufgabe 1. Träger der Blätter zu sein und 2. in seinem Innern das von den Wurzeln hergeführte Wasser bis zu den Blättern usw. weiter zu befördern und andererseits die von den Blättern gebildeten Assimilate an die verschiedenen Verbrauchsorte der Pflanzen (Trieb- und Wurzelspitzen, Blüten, Früchte) zu leiten. Es muß deshalb der Pflanze darauf ankommen, daß auf dem Transporte vom Produktions- zum Konsumorte möglichst wenig von dem wertvollen Wasser verloren geht.

a) Kork- und Borkenbildung. Deshalb findet in den Stengeln, welche perennierend sind, kurze Zeit nach ihrer Entstehung unter dem Oberhautgewebe eine Bildung von Kork statt, dessen Zellwände für Wasser undurchlässig sind. Diese Korkschicht wird nur an einzelnen Stellen von lockerem Gewebe durchbrochen, welches den Zweck hat, den Zutritt des für die Atmungsvorgänge im Innern des Stammes notwendigen Sauerstoffes der Luft zu ermöglichen. Mit der Zeit wird die Korkschicht immer dicker, es bildet sich um den Stamm und den Stengel eine Rinde oder Borke. Sollte, durch Tiere oder Menschenhand verursacht, eine Verletzung der schützenden Rinde hervorgerufen sein, so hilft sich der Baum dadurch, daß er eine Wundmasse absondert, die eine Ueberwallung der Wunde herbeiführt und damit einen unnötigen Wasserverlust aus dem Stamme verhütet. Nicht selten sucht der Baum auch durch Harz- oder Gummiausscheidungen den erlittenen Schaden zu heilen.

b) Wachsüberzüge. Aber auch an den Stengeln einjähriger Pflanzen finden wir als wirksames Schutzmittel gegen zu starke Verdunstung Wachsüberzüge, so namentlich an den Stengelknoten des Zuckerrohrs. Dort besteht der Wachsüberzug aus dicht nebeneinander stehenden langen Stäbchen, die vielfach an der Spitze hirtenstab-, zum Teil auch lockenförmig gekrümmt sind.

c) Leimzotten, Wollhaare. Um die in den Knospen angelegten jungen Blätter und Triebe vor einer zu starken Verdunstung des Wassers aus ihnen zu schützen, werden an den aufbrechenden Knospen, z. B. der Roßkastanie, Leimzotten gebildet, während diejenigen des Rebstockes mit schützenden Wollhaaren umkleidet sind.

2. Schutzmittel gegen Ersticken. Ueber die Bildung von Luftgängen, die man Lenticellen nennt, ist bereits oben unter 1 a) das nötige gesagt. Solche Luftgänge kann man besonders schön an den Flaschenkorken beobachten, die bekanntlich aus dem Kork der Korkeiche hergestellt werden.

III. Schutzmittel an den Wurzeln.

A. Gegen Ernährungsstörungen.

1. Wurzelhaube. Die Wurzeln sind, mit wenigen Ausnahmen, ihrer Bestimmung gemäß gezwungen, in mehr oder weniger hartes Erdreich einzudringen. Ihre Spitzen werden dabei durch die Gewebe, welche sich an ihr in kräftiger Streckung befinden, mechanisch vorgeschoben. Die Zellen dieser Wurzelspitzen sind äußerst zart und weich und würden, wenn sie nicht eine Schutzvorrichtung besäßen, sehr leicht verletzt werden. Das würde aber eine Schädigung des gesamten Wurzelwerkes der Pflanzen bedeuten, da sich unmittelbar über der Wurzelspitze diejenigen Organe ausbilden, welche das Wasser und die mineralischen Stoffe aus dem Erdreich aufnehmen, die Wurzelhaare. Eine Verletzung der Wurzelspitze würde also eine mangelhafte Versorgung der Pflanzen mit den genannten wertvollen Stoffen oder eine mangelhafte Ernährung des gesamten Pflanzenkörpers bedeuten. Deshalb mußte die Natur gerade an den Wurzelspitzen eine Vorrichtung schaffen, welche die Verletzung dieser Organe verhütete. In der Tat sehen wir, daß jedes kleinste Würzelchen mit einem Gewebemantel, der Wurzelhaube, versehen ist, welche den erwünschten Zweck voll erfüllt. Diese Schutzvorrichtung sehen wir sogar an den Wurzelspitzen der Wasserpflanzen, wo sie direkt gar nicht notwendig wäre. Man kann sie mit bloßem Auge z. B. an jeder Wurzel der Teichlinse (Lemna) sehen.

2. Korkbildung. Wenn das Wasser von den Wurzelhaaren aufgenommen worden ist, wird es bis zum Zentralzylinder, der sich in jeder Wurzel befindet und der von einer Scheide von kräftigeren Zellen umgeben ist, geleitet. Von hier aus steigt es in die Höhe zum Stamm. Wie letzterer keinen Verlust an dem transportierten Wasser erleiden soll, so auch die Wurzeln. In ihren älteren Partien umkleiden sie sich deshalb, wie die Stämme, mit einer wasserundurchlässigen Korkschicht, die zugleich eine Verwesung der Wurzeln hintanhalten soll.

B. Gegen Tierfraß

Gifte und Bitterstoffe. Da sich die Wurzeln für gewöhnlich in der Erde befinden, so sind sie dort der Gefahr, von erdbewohnenden Tieren, die hier ihre Nahrung suchen, gefressen zu werden, sehr leicht ausgesetzt. Wir sehen deshalb, daß manche Wurzeln sich durch Ablagerung von Gift- und Bitterstoffen vor dem Tierfraß schützen, so z. B. die Wurzeln der Berberitze durch das Berberin, die Wurzeln von Veratrum album (Nießwurz) durch Veratrin, von Cephaelis ipecacuanha (Brechwurzel) durch Emetin, von Chelidonium majus (Schöllkraut) durch Chelidonin, die Wurzeln der Enziane (Gentiana punctata, lutea, Pannonica) durch Bitterstoffe u. a.

C. Gegen Ersticken.

Hügelpflanzung. Atemwurzeln. Dieser Gefahr sind besonders solche Wurzeln ausgesetzt, die im Wasser stehen. Vielfach muß man ja die Beobachtung machen, daß gerade Bäume, deren Wurzeln nicht mit

Schutzvorrichtungen gegen das Ersticken ausgerüstet sind, zugrunde gehen, weil sie in einem zu nassen Untergrunde wachsen. Hierzu gehören vor allem unsere Obstbäume. Sie unterliegen aus dem Grunde, weil ihre Wurzeln unter so ungünstigen Verhältnissen die Atmung, die zur Erhaltung pflanzlichen, wie tierischen Lebens unbedingt notwendig ist, nicht in genügendem Maße ausführen können. Der Mensch kommt deshalb den Obstbäumen, die in einen Boden mit nassem Untergrund gepflanzt werden, dadurch zu Hilfe, daß er sie auf Hügel setzt. Bei Sumpfpflanzen, deren Wurzeln sich im Wasser befinden, wird die notwendige Luft durch die Sprosse mit äußerst lockerem Gewebe in die Pflanzen geleitet, wie durch die Lenticellen in die Stämme. Anders helfen sich die im Meerwasser stehenden, schon erwähnten Mangrovebäume. Damit sie nicht im Wasser ersticken, senden sie Wurzeln in die Luft, welche Oeffnungen besitzen. Teils durch diese Oeffnungen, teils durch die Haut dringt der Sauerstoff der atmosphärischen Luft in die Wurzeln ein und wird von da in tiefer gelegene, vom Wasser bedeckte Partien des Baumes geleitet. Solche Wurzeln bezeichnet man mit Recht als Atemwurzeln.

D. Gegen zu starke Verdunstung.

Velamen bei Orchideen. Die baumbewohnenden Orchideen sind dadurch ausgezeichnet, daß sie Luftwurzeln bilden, die mit einer sinnreichen Schutzvorrichtung versehen sind. Um sich haben diese Wurzeln ein schwammartiges Gewebe ausgebildet, welches als Wasserbehälter dient. Zur Zeit des Regens saugt es sich nämlich wie ein Schwamm voll mit Wasser, wobei es die Luft aus seinem Gewebe verdrängt, durchsichtig wird und die grünen Chlorophyllkörner der Wurzeln durchscheinen läßt. In dem Maße, als dieses aufgespeicherte Wasser aus dem Wasserbehälter an die Wurzeln abgegeben wird, färbt sich dieser Schleier (Velamen) weiß, weil an Stelle des Wassers wieder Luft dringt. Die weiße Farbe des Velamen wird also auf dieselbe Weise durch total reflektiertes Licht hervorgerufen, wie diejenige der weißen Lilie.

IV. Schutzmittel an den Blüten gegen die Unbilden der Witterung.

Schließen der Blumenblätter. Besonders die Blüten, welche sich im ersten Frühling oder im späten Herbst öffnen, zu welcher Zeit auf einen warmen Tag eine kalte, wohl auch frostige Nacht mit Reif folgt, bedürfen eines Schutzes gegen zu niedere Temperaturen (Schneeglöckchen, Marienblümchen, Anemonen, Crocus, Tulpen, Herbstzeitlose u. a.). Dieser Schutz besteht darin, daß sie sich bei niederer Temperatur schließen, bei erhöhter Temperatur dagegen wieder öffnen, um befruchtet werden zu können. Das Schließen und Oeffnen geschieht in der Weise, daß im ersteren Falle die Außenseiten der Blütenblätter wachsen, im letzteren Falle dagegen die Innenseiten. Manche der Blüten sind für Temperaturschwankungen sehr empfindlich, wie z. B. Tulpen und Crocus.

Vor den Unbilden der Witterung, namentlich vor Regen und zu starker Abkühlung oder vor unliebsamem Insektenbesuch schützen sich in gleicher Weise die Blüten anderer Pflanzen, z. B. der Seerosen, des Löwenzahns und anderer Korbblütler, der Kakteen usw., indem sie sich bei eintretender Dunkelheit schließen und beim Erwachen des Tages wieder öffnen (Fig. 12). Umgekehrt verhalten sich die sogenannten „Nachtblütler", zu denen in erster Linie die „Königin der Nacht", dann die nachtblühende Pechnelke oder das nachtblühende Leimkraut (Silene noctiflora) zu zählen sind. Manche Blüten, wie z. B. die der Tulpen, schließen sich sowohl bei niederer Temperatur, als auch bei eintretender Dunkelheit.

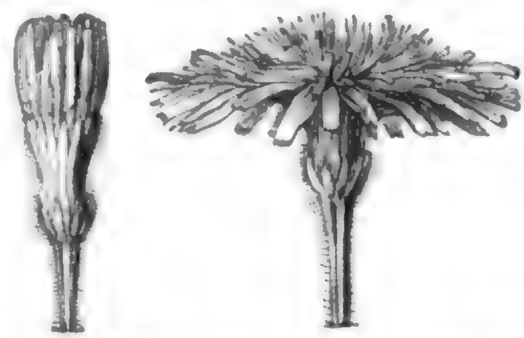


Fig. 12. Blütenköpfchen einer Löwenzahnart (Leontodon hastilis). Links durch Verdunkelung geschlossen, rechts nach Belichtung geöffnet. Aus Detmer, Physiologisches Praktikum.

V. Schutzmittel an den Samen und Früchten.

A. Gegen Verkümmerung.

Mittel zur Verbreitung der Samen. Die Pflanzen erzeugen nach jeder Vegetationsperiode aus den Blüten eine sehr große Menge von Früchten und Samen, welche die Erhaltung der Pflanzenart garantieren sollen. Dabei haben sich in der Pflanzenwelt aber auch eine Anzahl Mittel herausgebildet, die es ermöglichen, daß der Same vom Orte seiner Entstehung entfernt wird, damit er günstige Entwickelungsbedingungen vorfindet, die seiner Verkümmerung entgegen-

wirken. Bald sind es die Tierwelt anlockende Nährstoffe von fleischigen Früchten, die in ihrem Innern die Samen bergen (Apfel), bald sind es Schleudervorrichtungen in den Früchten (Impatiens noli tangere, Springkraut, Momordica elaterium, Springgurke), bald Flügel an den Samen (Ahorn, Esche, Ulme), bald Bänder, die sich in feuchter Luft aufrollen, in trockener aber wieder zusammenrollen (Sporen der Schachtelhalme), bald wieder Haarbildungen, welche in zweckmäßiger Weise für eine Verbreitung der Samen sorgen. Mit Haarbildungen sind besonders ausgestattet die Samen der Weiden, Pappeln, der Baumwolle oder die Früchte der Waldrebe (Clematis), der Anemonen und der Korbblütler. Infolge der Haarbildungen werden die Samen und Früchte weithin vom Winde fortgetragen.

B. Gegen unliebsame Verbreitung.

Zusammenlegung des Pappus. Trotzdem finden wir an manchen Samen auch Vorrichtungen, welche eine Verbreitung derselben bei ungünstigen klimatischen Verhältnissen (Regen) verhindern sollen. Ganz besonders sinnreich ist in dieser Hinsicht der Flugapparat des Samens vom Löwenzahn konstruiert. Der Haarkelch, welcher an dem Fruchtende steht, besitzt die Gestalt eines Fallschirmes, und einmal in die Luft getragen, schwebt der Same wie ein kleiner Luftballon lange in der Luft dahin. Die günstigsten Bedingungen sind dann gegeben, wenn die Luft recht trocken ist. Dann kann er mit Hilfe seines Fallschirms eine recht weite Reise unternehmen, die ja im Interesse der Pflanze liegt. Aeußerst ungünstig dagegen sind die Verbreitungsverhältnisse, sobald Regenwetter eintritt. Gegen die unliebsame Verbreitung des Samens bei ungünstiger Witterung besitzt nun der Löwenzahn ein ganz wirksames Schutzmittel. Sobald Regenwetter eintritt, legt sich der Fallschirm zusammen, und erst wenn die Luftverhältnisse wieder günstiger geworden sind, breitet er sich von neuem aus.

C. Gegen Verbrennungen durch chemische Stoffe.

Korkbildung. Die Weingärtner sind alljährlich gezwungen, die Reben gegen das Auftreten des echten Mehltaues (Oïdium Tuckeri) mit Schwefelpulver zu bestäuben. Ist nun aber die Lufttemperatur im Weinberg eine zu hohe, wie z. B. im Jahre 1911, dann entwickelt sich aus dem Schwefel eine zu große Menge schwefliger Säure, welche die Weinbeeren auf der Sonnenseite verbrennt. Diesen Schaden sucht die Pflanze durch Bildung eines Schutzkorkes unter den verbrannten Gewebeteilen wieder gut zu machen. War die Verbrennung nur eine geringe, so werden durch den Schutzkork, der bei weiterem Dickenwachstum der Beeren Risse bekommt, die betroffenen Beeren gerettet. Waren aber die Verbrennungen zu tief gehende, so wird zwar auch die Korkschicht gebildet, die Beeren platzen aber später auf und fallen anderen schmarotzenden Pilzen (Schimmelpilzen) zum Opfer.

D. Gegen die Angriffe von Pilzen.

Korkbildung. Die Aepfel und Birnen werden vielfach von dem Schorfpilz (Fusicladium dendriticum und Fus. pirinum) befallen. Die Pilzsporen senden ihre Pilzfäden in das Innere der Früchte und töten dort Zellkomplexe ab. Die Früchte suchen dem Weitervordringen der Pilzfäden Einhalt zu gebieten, indem sie eine Korkschicht bilden und so den Pilz auf das Trockene setzen. Dieser aber dringt zwischen Oberhaut und Cuticula in gesunde Partien der Früchte ein, worauf eine 2., 3. usw. neue Korkschicht im tiefer gelegenen Gewebe von ihnen gebildet wird. So besteht ein fortgesetzter Kampf zwischen Pilz und Frucht. Der Effekt ist der, daß zwar kleinere Partien der letzteren abgetötet werden, wodurch in Verbindung mit der Bildung der Korkschichten braune Flecke auf ihrer Oberfläche entstehen, daß aber die Frucht und vor allem die in ihr vorhandenen Samen gerettet werden.

E. Gegen Tierfraß.

Gifte. Viele Samen und Früchte sichern sich gegen Tierfraß durch Ablagerung von Giftstoffen in ihrem Innern, so die unreifen Samenkapseln des Mohn durch Opiumbasen, die Samen der Brechnuß und Ignatiusbohne (Strychnos nux vomica und Strychnos Ignatii) durch Strychnin und Brucin, die Samen der Herbstzeitlose (Colchicum autumnale) durch Colchicin, die Tollkirschen (Atropa Belladonna) und Stechäpfel (Datura Stramonium) durch Atropin u. a.

F. Gegen zu starke Verdunstung des Wassers aus den Früchten.

Wachs, Cuticula. Viele Früchte tragen auf ihrer Oberfläche einen weißen „Duft“ oder „Flaum“, so namentlich die Zwetschen, Weinbeeren, Kirschen, Aepfel, Birnen u. a., den man abwischen kann und der aus Wachs besteht. Unter dieser Wachsschichte befindet sich dann gewöhnlich eine Cuticula, die nur von Korkwarzen, den Luftgängen der Früchte, unterbrochen wird. Zum

Schluß sei darauf hingewiesen, daß sich das Plasma vieler Samen jahrelang am Leben erhalten kann, wenn sie im lufttrockenen Zustande aufbewahrt werden. Es gleicht in dieser Hinsicht dem Plasma der Selaginellen.

Literatur. ***Kerner von Marilaun,*** *Pflanzenleben. Leipzig und Wien 1896.* — ***H. Marzell,*** *Die Pflanzenwelt der Alpen. Stuttgart 1909.* — ***R. Meissner,*** *Die Schutzmittel der Pflanzen. Stuttgart 1910.* — ***J. v. Sachs,*** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. Leipzig 1887.* — ***E. Strasburger, L. Jost, H. Schenck, G. Karsten,*** *Lehrbuch der Botanik, 10. Aufl., Jena 1910.* — ***A. W. F. Schimper,*** *Pflanzengeographie. Jena 1898.*

R. Meissner.

Schutzrinde.

Die dunkle, meist aus Mangan- und Eisenoxyden bestehende Rinde vieler Gesteine in den Wüsten (vgl. den Artikel „Atmosphäre").

Schwaden, giftige.

Siehe „Schlagende Wetter".

Schwämme.

Spongien, der niederst stehende Typus mehrzelliger Tiere (vgl. den Artikel „Porifera").

Schwann

Theodor.

Geboren am 7. Dezember 1810 zu Neuß, gestorben am 14. Januar 1882 zu Köln a. Rh. Widmete sich seit 1829 in Bonn, Würzburg und Berlin dem Studium der Philosophie und Medizin und war 1834 bis 1839 Assistent bei Johannes Müller. In dieser Zeit entdeckte er das Pepsin im Magensaft, veröffentlichte zahlreiche wichtige Untersuchungen über die künstliche Verdauung, über die doppelsinnige Leitung der Nerven, über das Gesetz der Muskelzusammenziehung, über die Existenz besonderer Wandungen in den Capillaren usw. Ein besonderes Verdienst Schwanns ist es, den Nachweis geführt zu haben, daß tierische sowohl wie pflanzliche Gewebe aus denselben Elementarorganismen, den Zellen, bestehen und daß die Zellenbildung das gemeinsame Entwickelungsprinzip für das Entstehen und das Wachstum der Tiere und Pflanzen sei. Er legte diese epochemachenden Beobachtungen nieder in seinen „Mikroskopischen Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachstum der Tiere und der Pflanzen", Berlin 1839. Mit dieser wichtigen Entdeckung war die bis dahin bestehende Schranke von Tier und Pflanze hinweggeräumt und ein mächtiger Anstoß für die weitere Entwickelung der mikroskopischen Forschung wie für die Naturwissenschaft überhaupt gegeben. Schwanns Name ist mit dem von Schleiden unzertrennbar als Begründer der Zellenlehre verknüpft. Seine theoretischen Folgerungen über die Entstehung der Zellen haben indessen der neuen Forschung nicht Stand gehalten, namentlich nicht die Ansicht, daß Zellen sich frei bilden könnten. Von seinem äußeren Lebensgange ist noch zu erwähnen, daß er 1838 als ordentlicher Professor der allgemeinen und beschreibenden Anatomie nach Löwen, 1848 in gleicher Eigenschaft nach Lüttich berufen wurde, wo er noch den Lehrstuhl der Physiologie mit übernahm. Außer verschiedenen Aufsätzen in Zeitschriften veröffentlichte er später noch: „Traité d'anatomie du corps humain", 2 Bde. in der Brüsseler „Encyclopédie populaire".

Literatur. ***Carus,*** *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — ***Burckhardt,*** *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Schwarzerde

= Tschernosjom. Ein in Rußland weit verbreiteter, durch humose Substanzen schwarz gefärbter Löß (vgl. den Artikel „Atmosphäre").

Schwere.

1. Allgemeine Gravitation. Newtonsches Gesetz. Gravitationskonstante G. 2. Schwerkraft, Schwerebeschleunigung, Gewicht. 3. Gewichtseinheit im technischen und absoluten Maßsystem. 4. Absolutes Gewicht. 5. Spezifisches Gewicht, Dichte. 6. Methoden zur Bestimmung der Schwerebeschleunigung. 7. Normale Aenderung der Schwere mit der Höhe. Reduktion derselben auf Meeresniveau. 8. Veränderung der Schwerebeschleunigung mit der Tiefe. 9. Einfluß der Erdrotation auf die Schwere: Zentrifugalkraft, Abplattung der Erde, Terrestrisches Ellipsoid, Geoid, Normalbeschleunigung, Normalsphäroid. 10. Clairautsches Theorem. 11. Verteilung der Schwere auf der Erdoberfläche. Massenüberschuß. Massendefekt. 12. Anomale Lotablenkungen durch spezifisch schwere Gesteine und durch Hohlräume. 13. Gezeiten. 14. Methoden zur Bestimmung der

Gravitationskonstante G und der mittleren Erddichte Δ. Ia) Lotmessungen. Ib) Pendelmessungen. IIa) Messungen mit der Drehwage. IIb) Messungen mit dem Doppelpendel. IIc. Messungen mit der gewöhnlichen Wage. 15. Ergebnisse der Gravitationsmessungen. Masse der Erde. 16. Massenverteilung innerhalb der Erde. 17. Gültigkeitsgrenzen des Newtonschen Gesetzes. Astronomische und experimentelle Prüfung. Ia) Abhängigkeit der Gravitation von der Masse. Ib) Abhängigkeit der Gravitation von der Entfernung. IIa) Einfluß der Temperatur und des Mediums auf die Gravitation. IIb) Abhängigkeit der Gravitation von der Zeit. IIc) Erweiterung des Newtonschen Gesetzes für bewegte Körper. IId) Erweiterung des Newtonschen Gesetzes für unendlich große Massen. 18. Erklärungsversuche der Gravitation. Allgemeines. Ia) Aetherstoßtheorien. Ib) Hydrodynamische Theorien. Pulsationen. Aetherschwingungen. Ic) Druckdifferenzen im Aether, Aetherströmungen. II. Elektrostatische bezw. -magnetische Gravitationstheorien.

1. Allgemeine Gravitation. Newtonsches Gesetz. Gravitationskonstante. Unter Gravitation versteht man die allgemeine, gegenseitige Massen„anziehung“, welche zwischen sämtlichen ponderablen Körpern des Universums wirksam ist. Das von Newton im Jahre 1687 aufgestellte und nach ihm benannte Grundgesetz der Gravitation lautet folgendermaßen: Befinden sich zu einem gewissen Zeitpunkt in der Entfernung r voneinander irgend zwei Massen m_1 und m_2, deren Dimensionen, bei beliebiger äußerer Form, außerordentlich klein im Verhältnis zu ihrem beiderseitigen Abstande sind, so besteht zwischen jenen beiden Massen in Richtung ihrer Verbindungslinie eine Kraft (Zentralkraft), mit der sich dieselben scheinbar gegenseitig anziehen. Diese Kraft K ist direkt proportional der Größe der beiden Massen m_1 bezw. m_2 und umgekehrt proportional dem Quadrate ihres Abstandes r. Ihr Zahlenwert berechnet sich nach der Formel

$$K = G \frac{m_1 . m_2}{r^2} \quad \ldots \ldots (1)$$

Der Faktor G hat hierbei eine einfache physikalische Bedeutung; er stellt diejenige Kraft dar, mit der 2 Masseneinheiten in der Einheit der Entfernung aufeinander wirken. Diese Größe wird Gravitationskonstante genannt. Sie ist eine universelle, nur von der Wahl des Maßsystems abhängige Naturkonstante. Nach den neuesten Messungen ergab sich für die Gravitationskonstante der Wert $6.667 . 10^{-8}$ absolute Einheiten (vgl. Abschnitt 15), wenn wir als Maßeinheiten diejenigen des absoluten Maßsystems zugrunde legen (vgl. Abschnitt 3).

Von besonderem Interesse ist noch der Weg, auf welchem Newton zu seinem obigen Attraktionsgesetz gelangte. In den Jahren 1609 bezw. 1619 hatte Kepler auf Grund der Kopernikanischen Anschauungen seine drei bekannten Gesetze der Bewegung der Planeten um die Sonne abgeleitet. Hieraus folgerte dann Newton auf mathematischem Wege, daß zwischen der Sonne und einem Planeten in jedem Zeitmoment eine gegenseitige Anziehung bestehen muß, die proportional dem Produkte der Massen beider Körper und umgekehrt proportional dem Quadrate ihres jeweiligen Abstandes ist. Ferner zeigte Newton, daß auch die Rotation der Monde um die Planeten demselben Gesetze folgen muß. Gleichzeitig aber erkannte er — und das ist unstreitig sein größtes Verdienst —, daß auch die Schwerewirkung, welcher alle Körper auf unserer Erde unterliegen, ihrem Wesen nach keine andere ist, als jene zwischen den Himmelskörpern vorhandene Anziehungskraft. So wurde Newton auf die Idee der allgemeinen Gravitation geführt, welcher alle ponderablen Körper des ganzen Universums unterliegen.

2. Schwerkraft. Schwerebeschleunigung. Gewicht. Eine spezielle Aeußerung der allgemeinen Massenanziehung oder Gravitation ist die Schwerkraft auf unserer Erde. Sie ist die Ursache, daß im luftleeren Raume alle freigelassenen Körper mit derselben beschleunigten Geschwindigkeit (Erdbeschleunigung oder Schwerebeschleunigung; über deren Bestimmungsmethoden vgl. Abschnitt 6) dem Mittelpunkte der Erde zustreben, und bewirkt andererseits, daß diejenigen Körper, welche am Fallen verhindert sind, auf ihre Unterlage einen Druck bezw. auf ihre Aufhängung einen Zug ausüben, welcher als ihr Gewicht bezeichnet wird. In diesem Sinne bedeutet Gewicht eine statische Kraftwirkung. Die obige Definition des Gewichtes erscheint indessen zu eng gezogen, sobald wir die Körper in der Atmosphäre betrachten. Auch ein ruhig schwebender Luftballon hat ein Gewicht. Wir müssen daher das Gewicht eines Körpers ganz allgemein als die Kraft definieren, mit welcher derselbe von der Erde angezogen wird. Unter diese Definition des Gewichtes fällt dann auch zugleich die kinetische Kraftwirkung der Schwere, welche auf einen fallenden, auf einen geworfenen Körper usw. wirksam ist. Hiermit ist auch ohne weiteres verständlich, daß das Gewicht eines Körpers keine konstante Größe ist, sondern mit dem jeweiligen Orte auf der Erde sich ändert, und zwar fällt das Gewicht eines und desselben Körpers im allgemeinen um so größer aus, je näher sich derselbe dem Mittelpunkte der Erde befindet.

Die Richtung, in welcher die Schwerkraft wirkt, heißt lotrecht oder vertikal, jede darauf senkrechte Linie oder Ebene wagerecht oder horizontal. Zur Bestimmung der vertikalen bezw. horizontalen Richtung bedient man sich des Senklotes, der Setzwage, Wasserwage, Röhren- und Dosen-

libelle (über anomale Lotrichtungen vgl. Abschnitt 12). Auch die freie Oberfläche einer größeren Flüssigkeit stellt sich in die horizontale Richtung ein und kann zur Bestimmung derselben benutzt werden.

3. **Gewichtseinheit im technischen und absoluten Maßsystem.** Für jeden Körper ist das Verhältnis der Schwerkraft K zu der von ihr hervorgebrachten Erdbeschleunigung g eine Konstante, welche man die Masse dieses Körpers nennt. Es ist also $K = m \cdot g$ oder aber, da die Anziehungskraft der Erde auf einen Körper als dessen Gewicht (P) bezeichnet wird, so können wir auch schreiben $P = m \cdot g$.

Als Einheit des Gewichtes bedient man sich bei physikalischen Problemen zweier verschiedener Größen, je nachdem man das technische (praktische) oder aber das absolute Maßsystem zugrunde legt. Zwar arbeitet man im allgemeinen heute nur noch mit dem letzteren System, doch ist es üblich, in denjenigen Gebieten der Physik, welche der Technik sehr nahe stehen, das praktische Maßsystem zu verwenden, so z. B. in der Elastizitäts-, Kapillaritäts- und Wärmetheorie.

Im technischen Maßsystem wird selbständig festgelegt die Einheit des Gewichtes, und zwar definiert man dieselbe als das Gewicht von 1 ccm Wasser bei 4° C im Meeresniveau in 45° Breite. Diese Gewichtseinheit heißt 1 Grammgewicht. Von dieser Einheit macht man dann die der Masse abhängig. Man nimmt als Einheit der Masse diejenige, welcher durch die Einheit des Gewichtes die Schwerebeschleunigung von 1 cm/sec^{-2} erteilt wird. Da $m = \frac{P}{g}$ und die Normalbeschleunigung der Schwere unter 45° Breite im Meeresniveau 980,665 cm/sec^{-2} beträgt[1]), so besitzt also im praktischen Maßsystem die Einheit der Masse ein Körper, welcher im Meeresniveau unter 45° Breite 980,665 Grammgewichte wiegt. Die Richtigkeit dieser Annahme folgt daraus, daß die Masse eines Körpers als Quotient aus seinem Gewichte P und seiner Schwerebeschleunigung g stets konstant bleibt.

Natürlich kann man als Einheit des Gewichtes auch die Schwere von 1 Kilogrammgewicht im Meeresniveau unter 45° Breite zugrunde legen. Entsprechend nimmt man als Einheit der Länge 1 m, und die Einheit der Masse hat dann ein Körper, der im Meeresniveau unter 45° Breite 9,80665 Kilogrammgewichte wiegt.

Bei dieser im technischen Maßsystem üblichen Definition der Gewichtseinheit ergibt sich jedoch der große Nachteil, daß man diese Einheit selbst nicht festlegen kann. Das Gewicht eines Kubikzentimeters Wassers ändert sich mit dem Orte auf der Erde entsprechend den Schwankungen der Schwerebeschleunigung. Letztere aber nimmt vom Aequator bis zu den Polen um ca. ½% zu und ändert sich zudem auch mit der Höhe (vgl. weiter unten). Wählen wir also als Einheit des Gewichtes die Schwere eines Grammstückes im Meeresniveau unter 45° Breite, so müßte man bei Messungen in anderer Breite streng genommen zunächst das Gewicht des Einheits-Grammstückes für den jeweiligen Ort der Erde umrechnen, oder aber man müßte sich für jeden Ort der Erde genaue, daselbst richtige Gewichtseinheiten besonders herstellen. Im praktischen Leben sieht man jedoch hiervon ab, da die maximal mögliche Schwankung von ca. ½% nur sehr gering ist. Im übrigen aber ist ja auch meistens die Kenntnis des Gewichtsdruckes gleichgültig, da zur Vergleichung der Quantität des Gewogenen auch die Masse als Maßstab dienen kann. „Der Chemie, dem Handelsverkehr, der Medizin ist es nicht um den Druck der Körper auf ihre Unterlage zu tun, sondern um die Masse, durch welche die chemische Wirksamkeit, der Geld- oder der Nahrungswert usw. bedingt wird“ (F. Kohlrausch). Was man im gewöhnlichen Sprachgebrauch als „Gewichtssatz“ bezeichnet, ist ja nichts anderes als ein Massensatz, ebenso ist jede „Gewichts“bestimmung in Wirklichkeit ja eine Massenbestimmung.

Diese entspricht den Einheiten des absoluten Maßsystems, des Zentimeter-Gramm(Masse)-Sekunden-Systems (CGS), in welchem wegen der Unzweckmäßigkeit einer willkürlich festgelegten Gewichtseinheit selbständig die Einheit der Masse definiert wird. Einheit der Masse ist hier diejenige eines Kubikzentimeters Wassers bei 4° C; dieselbe heißt 1 Gramm-Masse (das gesetzlich festgelegte Gramm ist nach späteren Messungen mit den allerfeinsten Hilfsmitteln die Masse von 1,000027 ccm Wasser von 4° C). Daraus folgt dann als Einheit des Gewichtes dasjenige, welches einer Masseneinheit (1 g) die Einheit der Schwerebeschleunigung (1 cm/sec^{-2}) erteilt. Da nun aber die Normalbeschleunigung der Schwere unter 45° Breite im Meeresniveau 980,665 cm/sec^{-2} beträgt, so ist also die Einheit des Gewichtes gleich dem Normalgewichte eines Körpers (Meeresniveau, 45° Breite), dessen Masse $^1/_{980,665}$ g oder 1,01972 mg beträgt.

Eine Gegenüberstellung der beiden Maßsysteme ergibt also folgendes Bild:

---

[1]) Dieser Wert wurde von der internationalen Generalkonferenz für Maß und Gewicht als Normalbeschleunigung der Schwere unter 45° Breite und im Meeresniveau adoptiert. Die von Helmert (1910) nach dem neuesten Beobachtungsmaterial berechnete Schwereformel (Gleichung 11a, Abschnitt 9) ergibt dafür den Wert 980,616 cm/sec^{-2}.

	Absolutes Maßsystem (Einheit der Länge 1 cm, Einheit der Zeit 1 sec)	Technisches Maßsystem (Einheit der Länge 1 cm, Einheit der Zeit 1 sec)
Als Grundmaß selbständig definiert.	Einheit der Masse gleich der Masse von 1 ccm Wasser bei 4° C; 1 Gramm-Masse.	Einheit des Gewichtes gleich dem Normalgewicht (Meeresniveau, 45° Breite) von 1 ccm Wasser bei 4° C; 1 Grammgewicht.
Abgeleitete Einheiten.	Einheit des Gewichtes gleich dem Normalgewicht (Meeresniveau, 45° Breite) von $^1/_{980,665}$ g-Masse.	Einheit der Masse gleich derjenigen eines Körpers, welcher im Meeresniveau unter 45° Breite 980,665 Grammgewichte wiegt.

Es ist ein großer Uebelstand, daß dem Worte „Gramm" eine doppelte Bedeutung beigelegt wird. Um jeden Irrtum auszuschließen, spricht man daher am besten stets von Grammgewichten, wenn man die technische Einheit des Gewichtes meint, oder aber von Gramm-Massen, wenn es sich um die absolute Einheit der Masse handelt. Nur im letzteren Falle kann man auch kurzweg das Wort Gramm benutzen, man meint dann damit stets eine Masse.

Die durch die obigen Definitionen festgelegten Einheiten des Gewichtes im technischen bezw. absoluten Maßsystem entsprechen übrigens gleichzeitig auch den Maßeinheiten der Kraft in jenen beiden Systemen, da sich ja jede Kraft durch die Schwerkraft eines Gewichtes ausdrücken läßt. Wir können daher auch sagen: im technischen Maßsystem ist die Einheit der Kraft (1 Grammgewicht oder auch 1 Grammkraft) gleich dem Normalgewicht (Meeresniveau, 45° Breite) von 1 ccm Wasser bei 4° C, im absoluten Maßsystem dagegen ist die Einheit der Kraft (1 Dyne) gleich dem Normalgewicht von $^1/_{980,665}$ Grammmasse (vgl. hierüber den besonderen Artikel „Kraftmessung").

4. Absolutes Gewicht. Nur im leeren Raume ist das Gewicht eines Körpers proportional seiner Masse. In der Luft oder einem anderen Gase verliert ein jeder Körper durch hydrostatischen Auftrieb so viel an seinem absoluten Gewicht, dem Gewicht im leeren Raum, wie das Gewicht der verdrängten Luft bezw. Gasmasse beträgt. Dieser Gewichtsverlust ist zwar so klein, daß er für die Zwecke des praktischen Lebens ohne weiteres vernachlässigt werden kann, doch muß bei allen genaueren wissenschaftlichen Messungen das Gewicht eines Körpers stets auf den leeren Raum reduziert werden. Dementsprechend muß dann ein richtig adjustierter Gewichtssatz so beschaffen sein, daß er im luftleeren Raume mit den Platiniridium-Prototypen übereinstimmt.

Die Masse eines Körpers ist konstant. Da aber bei Wägungen Massen durch Vergleichung der Schwerkräfte, der Gewichte, bestimmt werden, so muß auch bei jeder genaueren Massenbestimmung obige Reduktion auf den leeren Raum vorgenommen werden (vgl. den besonderen Artikel „Massenmessung").

5. Spezifisches Gewicht. Dichte. Das Gewicht der Volumeneinheit eines Körpers bezeichnen wir als sein spezifisches Gewicht. Im praktischen Maßsystem ist daher das spezifische Gewicht eines Körpers gleich der Anzahl der Grammgewichte eines Kubikzentimeters. Im absoluten Maßsystem dagegen ist die Dichte eines Körpers gleich der Anzahl seiner Masseneinheiten (g) in der Volumeneinheit und daher das spezifische Gewicht gleich der Dichte multipliziert mit der Normalbeschleunigung der Schwere für 45° Breite im Meeresniveau. Man vergleiche hierüber und über die verschiedenen Bestimmungsmethoden der spezifischen Gewichte den besonderen Artikel „Dichte und spezifisches Gewicht".

6. Methoden zur Bestimmung der Schwerebeschleunigung. Man unterscheidet absolute und relative Schweremessungen, je nachdem es auf den absoluten Wert der Erdbeschleunigung g an einem bestimmten Stationspunkte oder nur auf die relative Vergleichung der Beschleunigungswerte an verschiedenen Punkten der Erde ankommt. In allen diesen Fällen ist die exakteste Meßmethode in der Ausführung von Pendelmessungen gegeben. Man vergleiche hierüber den besonderen Artikel „Pendel", in welchem über Theorie und praktische Ausführung solcher Messungen in eingehender Weise berichtet wird. Nur auf eine Konstruktion sei hier noch besonders verwiesen, welche Sterneck im Jahre 1881 angegeben hat; dieselbe hat sich recht bald als ein überaus zweckentsprechender Reiseapparat zur Ausführung der relativen Schweremessungen erwiesen, so daß er bei den ausgedehnten Untersuchungsreihen der beiden letzten Jahrzehnte in erster Linie verwendet wurde.

Der Sterneck sche Pendelapparat setzt sich aus zwei Teilen zusammen, den invariablen Halbsekundenpendeln und dem Stativ mit Thermometer. Hierzu kommt noch ein besonderer Koinzidenzapparat zur

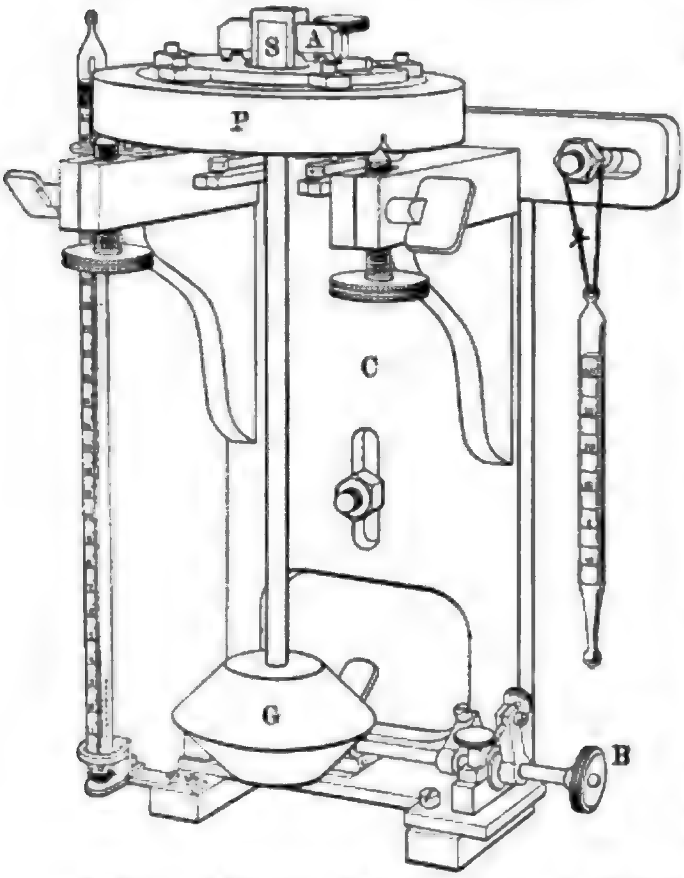


Fig. 1. Linse G wiegt ca. 1 kg. S Spiegel, A Schneide, C Wandplatte zur Befestigung an Mauerwerk, P obere Deckplatte, auf welche das Pendel aufgesetzt wird. Magazinthermometer von derselben Länge und Höhenlage wie das Pendel. Nach Messerschmitt.

exakten Bestimmung der Schwingungsdauer. Im übrigen sind aus der nebenstehenden Fig. 1 alle wesentlichen Bestandteile ohne weiteres ersichtlich.

Außer diesem Sterneckschen Pendelapparat wären noch zu erwähnen der relative Pendelapparat von Defforges und der ähnlich konstruierte Apparat von Mendenhall, doch haben diese bei weitem nicht eine so große Verbreitung gefunden wie die Konstruktion von Sterneck.

Alle Pendelapparate verlangen eine möglichst feste Aufstellung, bei der besonders darauf Rücksicht genommen werden muß, daß das Mitschwingen des Stativs auf ein Minimum herabgedrückt wird. Wir sind daher nicht imstande, auch auf den Ozeanen durch Pendelmessungen die Schwerebeschleunigung zu ermitteln. Nur auf dem Polareise konnte Scott-Hansen bei der Nansenschen Polarexpedition 1894/96 einige Messungen anstellen, doch dürften diese Resultate durch den Einfluß naher Inseln noch sehr beeinflußt worden sein.

Angesichts der relativ großen Meeresflächen, welche rund $^3/_4$ der ganzen Erde bedecken, ist aber die Möglichkeit einer zuverlässigen Schweremessung auf dem Wasser von größter Wichtigkeit. Man hat daher auf den verschiedensten Wegen versucht, eine brauchbare Methode auszuarbeiten, doch ist man bei der Konstruktion solcher Apparate nie über das eigentliche Versuchsstadium hinausgelangt. Erst neuerdings (1899) hat Mohn eine Methode angegeben, welche befriedigende Resultate ermöglicht. Diese Methode beruht darauf, gleichzeitig ein Quecksilberbarometer und ein Siedethermometer (Hypsometer) abzulesen. Letzteres gestattet, aus dem Siedepunkt des Wassers den Luftdruck direkt anzugeben, hierzu liegen genaue Tafeln vor. Andererseits ist die Einstellung der Quecksilbersäule im Barometer außer vom Luftdruck und von der Temperatur auch von der jeweiligen Größe der Schwerkraft abhängig. Um daher ein richtiges Maß des Luftdruckes zu erhalten, muß eine jede Ablesung an dem Quecksilberbarometer auf 0° C und auf einen Normalwert der Schwere reduziert werden, und zwar nimmt man als Normalschwere denjenigen Wert der Erdbeschleunigung, wie er unter 45° im Meeresniveau gültig ist. Hieraus ist nun ohne weiteres ersichtlich, daß wir durch die gleichzeitige Luftdruckbestimmung mittels Quecksilberbarometers und Hypsometers in der jeweiligen Differenz der beiden Meßresultate direkt ein Maß dafür erhalten, inwieweit die an dem Beobachtungsorte vorhandene Schwerebeschleunigung von deren obigem Normalwerte abweicht.

Bei der praktischen Ausführung dieser Methode sind allerdings noch eine Reihe von Spezialkonstruktionen notwendig geworden, welche auch bei bewegtem Seegang jederzeit ein exaktes Ablesen des Barometers gestatten. Ferner kommt es vor allem auch darauf an, mittels des Hypsometers dieselbe Genauigkeit in der Bestimmung des Luftdruckes zu erreichen, wie sie mit einem empfindlichen Quecksilberbarometer erhalten wird. Mit letzterem ist es heute möglich, den Luftdruck bis auf 0,01 mm zu bestimmen. Um diesen Genauigkeitsgrad auch mit dem Hypsometer zu bekommen, muß der Siedepunkt des Wassers bis auf ca. $^1/_{1000}$ °C genau ermittelt werden können, was allerdings bei den modernsten Siedethermometern keine Schwierigkeiten mehr bietet. Eine solche Messung, bei welcher sich der Luftdruck sowohl mit Quecksilberbarometer wie auch mit Hypsometer bis auf 0,01 mm ermitteln läßt, gestattet dann, wie die Rechnung zeigt, die relativen Aenderungen der Schwerebeschleunigung bis auf 0,129 mm anzugeben.

Die Methode Mohns ist somit sehr ge-

eignet, um auch auf den großen Ozeanen die relative Verteilung der Erdschwere mit befriedigender Genauigkeit zu bestimmen. Die ersten diesbezüglichen Versuche stammen von O. Hecker, welcher im Jahre 1901 auf Veranlassung Helmerts Schweremessungen auf dem Atlantischen Ozean zwischen Lissabon und Rio de Janeiro ausführte. Aus den Jahren 1904/05 liegen dann noch weitere Beobachtungsreihen Heckers auf dem Indischen und Stillen Ozean vor.

7. Normale Aenderung der Schwere mit der Höhe. Reduktion derselben auf Meeresniveau. Es wurde oben schon allgemein darauf hingewiesen, daß das absolute Gewicht, die Schwere eines Körpers im luftleeren Raume, mit dem Orte auf der Erde variiert. Es sollen nun im einzelnen die verschiedenen Ursachen besprochen werden, welche einen Einfluß auf die Größe der Schwerkraft haben.

Zunächst ist ohne weiteres ersichtlich, daß die Schwere eines Körpers mit seiner Erhebung über der Erdoberfläche abnehmen muß. Betrachten wir in erster Annäherung die Erde als eine Kugel, welche aus homogenen, konzentrischen Schichten zusammengesetzt ist, so muß offenbar die Schwere mit zunehmender Höhe umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung vom Erdmittelpunkte abnehmen. Die normale Aenderung der Schwere mit der Höhe über Meeresniveau läßt sich also leicht in folgender Weise berechnen. Bezeichnet $g_{\varphi.o}$ die Schwerebeschleunigung in einem Punkte des Meeres unter der Breite φ und $g_{\varphi.H}$ diejenige in der Höhe H über jenem Punkte, so ist

$$g_{\varphi.H} = g_{\varphi.o} \cdot \left(\frac{R}{R+H}\right)^2, \quad . \; . \; . \; (2)$$

wenn R den Halbmesser der Erde bedeutet.

Die größte bis jetzt erreichte Höhe beträgt etwa 10 km, das ergibt für H/R einen Wert, der noch etwas kleiner als $^1/_{600}$ ist. Alle höheren Potenzen dieses Bruches können wir daher vernachlässigen und erhalten somit näherungsweise die Beziehung

$$g_{\varphi.H} = g_{\varphi.o}\left(1 - \frac{2H}{R}\right)$$

$$= g_{\varphi.o} \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2} \cdot (1 - 0{,}0^8 3147 \,.\, H) \; . \, . \; . \; (3)$$

wenn die Höhe H in Zentimetern gemessen wird. Die Gleichung (3) können wir dann in der umgekehrten Form

$$g_{\varphi.o} = g_{\varphi.H} \cdot \left(1 + \frac{2H}{R}\right) \quad . \; . \; . \; . \; (4)$$

unter den obigen Voraussetzungen auch dazu verwenden, um die Reduktion der Schwere auf Meeresniveau auszuführen.

Dieses theoretische Ergebnis findet sich — trotz der oben gemachten vereinfachenden Annahme — durch die Versuche sehr gut bestätigt, solange man die Beobachtungen nur in freier Luft über Meeresniveau anstellt. Hier fallen ja die Abweichungen der Erdoberfläche von der Kugelgestalt sozusagen außer Betracht. Im Abschnitt 9 wird später die obige Reduktionsrechnung unter genauer Berücksichtigung der wahren Erdgestalt durchgeführt.

Weiterhin hat sich aber gezeigt, daß man in der Regel den Ausdruck (3) überhaupt ganz allgemein in der Nähe der Erdoberfläche wird anwenden können. Natürlich kann man die umgekehrte Beziehung (4) nicht dazu verwenden, um die auf dem Festlande gefundene Schwere auf Meeresniveau zu reduzieren. Wird auf einem Hochplateau mit der Höhe h über Meeresniveau die Schwerebeschleunigung $g_{\varphi.h}$ gefunden, so ist bei der Reduktion auf Meeresniveau nach der Theorie in erster Annäherung die folgende Form zu verwenden:

$$g_{\varphi.o} = g_{\varphi.h} \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2} \cdot (1 + 0{,}0^8 196 \,.\, h) \quad . \; . \; (5)$$

Im übrigen pflegt man heute ganz allgemein die Reduktion der Schwerewerte für eine beliebig gelegene Festlandstation nach dem von Helmert (1884) angegebenen Kondensationsverfahren vorzunehmen. Hiernach werden bei der Reduktion auf Meeresniveau nicht nur die darüber liegenden, sondern auch die bis zu einer gewissen Tiefe darunter liegenden Massen berücksichtigt. Als einheitliche Tiefe werden 21 km unter Meeresniveau gewählt, um so durch Berücksichtigung dieser gesamten Massen alle nahe der Erdoberfläche vorhandene ungleichmäßige Massenverteilung zu eliminieren.

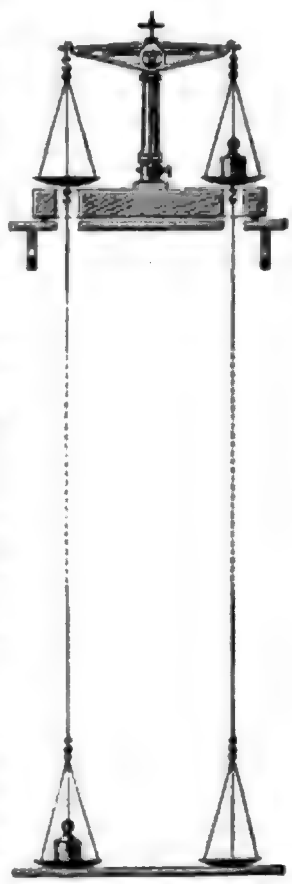


Fig. 2. Nach Messerschmitt.

Die ersten Messungen zur experimentellen Bestimmung der Abnahme der Schwere mit der Höhe stammen von Ph. v. Jolly in München; er bediente sich zu

diesem Zwecke einer sehr empfindlichen zweiarmigen Hebelwage, da innerhalb geringer Höhendifferenzen das Pendel noch keine Unterschiede anzeigt. Wie Fig. 2 veranschaulicht, wurden an jedem Balkenarme je zwei Wagschalen untereinander aufgehängt, und zwar betrug der vertikale Abstand dieser Schalen bei einer ersten Versuchsreihe 5,29 m und bei einer zweiten Reihe 21,005 m. Dabei befanden sich die beiden unteren Schalen im ersten Falle nur 0,2 m, im zweiten Falle dagegen 4 m über dem Erdboden. Wurden nun zwei gleiche Gewichtsstücke (je 1 kg bei der ersten bzw. je 5,00945 kg bei der zweiten Versuchsreihe) zunächst auf den beiden oberen Schalen ins Gleichgewicht gebracht und darauf das eine derselben auf die untere Wagschale gelegt, so mußte dieses jetzt entsprechend der Höhendifferenz eine Gewichtszunahme aufweisen. In der Tat erhielt Jolly auf diese Weise in den beiden Versuchsreihen eine Gewichtsdifferenz von 1,510 bzw. 31,686 mg, während sich nach Gleichung (3) der theoretische Wert dieser Gewichtsdifferenz zu 1,662 bzw. 33,06 mg berechnet. Dieser Rechnung wurde für R der in München gültige Wert von 6 365 722 km zugrunde gelegt. Wir sehen also, daß der theoretische Wert um 9 bezw. 4% größer ist als der beobachtete, was wohl auf den Einfluß der umgebenden Gebäudemassen zurückzuführen ist.

Analoge Messungen wurden später von Thiesen ausgeführt unter Benutzung der von Richarz und Krigar-Menzel zur Eichung eingereichten Gewichtskugeln, ferner in sehr ausführlicher Weise von F. Richarz und O. Krigar-Menzel bei der Bestimmung der mittleren Erddichte (vgl. Abschnitt 14) und weiterhin von Scheel und Diesselhorst in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Schreibt man die obige Gleichung (3) in der Form

$$g_{\varphi,H} = g_{\varphi,0} \frac{\text{cm}}{\text{sek}^2} \cdot (1 - \alpha \cdot H) \quad \ldots (3a)$$

so ergeben die verschiedenen Versuchsreihen für α die folgenden Werte:

1881 Jolly (München)	$= 0{,}0^6 285$ / 301
1890 Thiesen (Breteuil)	309
1894 Richarz und Krigar-Menzel (Spandau)	291
1895 Scheel und Diesselhorst (Charlottenburg)	295
Theoretischer Wert nach Helmert	315

Bei sämtlichen experimentellen Bestimmungen ergab sich somit ein geringerer Wert, als es die Theorie verlangt, was zum Teil allerdings in dem Einfluß der umgebenden Gebäudemassen begründet ist. Nur Thiesen hat in dieser Hinsicht seinen Wert korrigiert und findet dann $0{,}0^6 278$, während der ursprüngliche Wert $0{,}0^6 248$ betrug. Nach Scheel und Diesselhorst ist jedoch bei dieser Reduktion ein Schreibfehler unterlaufen. Das Ergebnis wird berichtigt auf $0{,}0^6 309$. Bei den Messungen von Richarz und Krigar-Menzel dürfte übrigens der zu niedrig gefundene Wert sicherlich auch durch das Vorhandensein größerer Steinsalzlager bedingt sein, welche sich unter dem Beobachtungsorte Spandau befinden, zumal da dieselben infolge ihrer geringeren Dichte ihren Einfluß auch in der Lotrichtung und in den Werten der Pendelmessungen zu erkennen geben (vgl. Abschnitt 12).

Die Schwere eines Körpers nimmt also bei der Hebung um 1 m über Meeresniveau um rund 0,3 Milliontel ihres Wertes ab, es wird mithin das Gewicht eines Kilogrammstückes um 0,3 mg kleiner, wenn man es um 1 m hebt. Will man daher Wägungen bis auf 0,01 mg sicher ausführen, so dürfen die Schwerpunkte der Gewichte in den beiden Wagschalen höchstens 3 cm in der Höhe differieren.

8. Veränderung der Schwerebeschleunigung mit der Tiefe. Wäre die Erde eine homogene Kugel, so müßte die Schwere von der Oberfläche nach dem Mittelpunkte hin stetig abnehmen. Nun nimmt aber bekanntlich (vgl. Abschnitt 16) die Dichte der Erde von der Oberfläche nach dem Innern hin zu. Die Folge davon ist, wie die Theorie ergibt, daß die Schwere beim Eindringen in die Tiefe anfangs bis zu einem maximalen Werte zunehmen muß, und daß dieselbe erst von diesem Punkte an wieder allmählich abnimmt, um im Mittelpunkte der Erde gleich 0 zu werden. In welcher Tiefe das Maximum der Schwere erreicht wird, hängt davon ab, in welcher Weise sich die Dichte nach der Tiefe zu ändert. Nehmen wir mit Wiechert (vgl. Abschnitt 16) im Innern der Erde einen Kern von der Dichte 8,2 an, welcher außen von einer rund 1400 km dicken Gesteinsschale umgeben ist, deren Dichte von der Oberfläche nach innen hin von 2,6 bis 3,8 zunimmt, so muß das Maximum der Schwere an der Grenze von Mantel und Kern erreicht werden und den an der Erdoberfläche beobachteten Wert um 15% überschreiten.

Messungen der anfänglichen Zunahme der Schwerkraft mit der Tiefe sind verschiedentlich angestellt worden zwecks Bestimmung der mittleren Erddichte Δ (vgl. Abschnitt 14), deren Größe sich auf diese Weise bestimmen läßt, da dieser Wert neben der Dichte der oberen Erdschicht in den oben erwähnten Rechnungen vorkommt. Eine zuverlässige Schätzung des letzteren Wertes bildet allerdings eine große Schwierigkeit für die ganze Methode. Es sind hier zu erwähnen die neueren

Messungen von Sterneck (1882/86) in vier verschiedenen Gruben, speziell diejenigen in Přibram mit fünf Tiefstationen und 1099,3 m größtem Höhenunterschied. Rosén stellte 1890 Messungen in der Grube Sala in Schweden an. Neuerdings haben auch die Engländer (1908) in Indien und die Schweizer (1906) in mehreren Stationen des Simplontunnels beobachtet. Aus dem oben angeführten Grunde sind jedoch die Versuchsresultate im allgemeinen nur sehr wenig befriedigend.

9. Einfluß der Erdrotation auf die Schwere: Zentrifugalkraft. Abplattung der Erde. Terrestrisches Ellipsoid. Geoid. Normalbeschleunigung. Normalsphäroid. Bei allen bisherigen Betrachtungen hatten wir die Erde als ruhend angenommen. Der Einfluß der Erdrotation auf die Größe der Schwere macht sich aber in zweifacher Weise geltend, nämlich einmal direkt durch die Wirkung der Zentrifugalbeschleunigung und dann noch indirekt durch die Abplattung der Erde.

Die durch die Achsendrehung der Erde hervorgerufene Fliehkraft wirkt am Aequator der Schwerkraft gerade entgegen. Je mehr wir uns jedoch den Polen zuwenden, um so mehr nimmt der schwächende Einfluß der Zentrifugalkraft ab; an den Polen selbst wird er gleich Null, daselbst wirkt also die reine Gravitation der Erde.

Der Einfluß der Fliehkraft auf die Größe der Schwere läßt sich für den Aequator leicht berechnen: die Zentrifugalbeschleunigung erscheint allgemein in der Form $\frac{v^2}{a} = \frac{4\pi^2 a}{t^2}$. Hierin haben wir also für a den äquatorialen Halbmesser der Erde (6378200 m) und für t die Rotationsdauer der Erde mit 86164 Sekunden einzusetzen. Das ergibt dann für die Zentrifugalbeschleunigung am Aequator den Wert $\gamma_z = 3{,}39\,\text{cm/sec}^{-2}$. Es ist somit die Beschleunigung der reinen Erdschwere g um 3,39 cm/sec^{-2} größer als derjenige Wert, welcher aus den Beobachtungen resultiert, der also die bereits um die Zentrifugalbeschleunigung verminderte Erdbeschleunigung darstellt. Diese letztere Größe ($g_{0,0}$) ergibt sich aus zahlreichen Beobachtungen am Aequator zu 978,03 cm/sec^{-2}. Mithin ist daselbst die Beschleunigung der reinen Erdschwere $g = g_{0,0} + \gamma_z = 978{,}03 + 3{,}39 = 981{,}42\,\text{cm/sec}^{-2}$. Hieraus berechnet sich für den Aequator eine durch die Fliehkraft verursachte Verminderung der Schwere um $^1/_{289,5}$ ihres tatsächlichen Wertes.

Weiterhin läßt sich auch die Zunahme der Schwere nach den Polen zu infolge der verminderten Fliehkraft sehr leicht rechnerisch ermitteln, wenn wir wieder in erster Annäherung für die Erde eine vollkommene Kugelgestalt annehmen. Die Zentrifugalbeschleunigung nimmt dann vom Aequator nach den Polen hin aus zwei Gründen ab; einmal wegen der Abnahme des Radius der Parallelkreise proportional dem Kosinus der geographischen Breite φ — im gleichen Maße vermindert sich auch die Zentrifugalbeschleunigung der Erde —, sodann aber auch, weil die Fliehkraft senkrecht auf der Rotationsachse der Erde steht und nur ihre jeweilige vertikale, dem Kosinus der Breite φ proportionale Komponente der Schwere entgegenwirkt. Man vergleiche Fig. 3, in der für einen Punkt P unter der geographischen

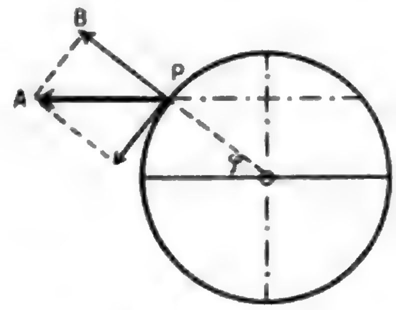


Fig. 3.

Breite φ die daselbst wirkende Zentrifugalbeschleunigung durch die Strecke PA dargestellt wird, während nur die vertikale Komponente $PB = PA \cos\varphi$ vermindernd auf die Erdschwere einwirkt. Wir haben somit die beiden Gleichungen:

$$g_{0,0} = g - \gamma_z \quad \text{und} \quad g_{\varphi,0} = g - \gamma_z \cdot \cos^2\varphi \qquad (6)$$

Durch Kombination derselben erhält man dann weiterhin:

$$g_{\varphi,0} = g_{0,0} + \gamma_z \cdot \sin^2\varphi \quad . \; . \; . \; . \; (7)$$

oder aber, da $\gamma_z = \frac{1}{289{,}5} \cdot g_{0,0}$ ist, wie oben abgeleitet wurde:

$$g_{\varphi,0} = g_{0,0} \cdot \left(1 + \frac{1}{289{,}5}\sin^2\varphi\right) \quad . \; . \; . \; 8)$$

Die Ableitung dieser Gleichung (8) wurde unter der Annahme einer vollkommenen Kugelgestalt der Erde durchgeführt. Es ist daher von vornherein nicht zu erwarten, daß dieses theoretische Resultat in der obigen Form bereits mit den Beobachtungsresultaten übereinstimmt. Stellt doch die Erde in Wirklichkeit keine Kugel dar, sondern mit weit größerer Annäherung einen an den Polen abgeplatteten Rotationskörper, was ja seinerseits auch wieder durch eine direkte, allerdings in weit zurückgelegenen Epochen der Erdgeschichte tätige Wirkung der Zentrifugalkräfte seine Erklärung findet. Diese Polabplattung der Erde ist nun der Grund, warum die Schwere vom Aequator nach den Polen zu noch in einem weit

höheren Maße zunimmt, als es die obige Rechnung verlangt. Um die tatsächlich beobachtete Abhängigkeit der Schwere von der geographischen Breite berechnen zu können, muß daher die Gleichung (8) noch eine Erweiterung erfahren, welche die wirkliche Gestalt der Erde berücksichtigt.

Zur experimentellen Ermittelung der wahren Erdgestalt sind zwei Wege möglich: 1. Gradmessungen, 2. Pendelmessungen. In der Tat ergeben diese Beobachtungen, daß der polare Durchmesser b der Erde etwas kleiner (ca. 43,6 km) ist als der äquatoriale Durchmesser a. Von Abweichungen höherer Ordnung abgesehen, hat die Erde die Gestalt eines Sphäroids, das ist eines an den Polen schwach abgeplatteten Rotationsellipsoides (terrestrisches Ellipsoid oder Erdellipsoid). Für die Abplattung $\alpha = \frac{a-b}{a}$ berechnete Bessel aus den 10 zuverlässigsten Gradmessungen den Wert $^1/_{299,1528}$ Neuerdings haben die äußerst exakten Pendelmessungen Helmerts und anderer Geodäten den Wert gleich $^1/_{298,3}$ gleich 0,003353 ergeben.

Unter Zugrundelegung dieses letzteren Wertes für die Abplattung der Erde läßt sich nun derjenige Anteil der Zunahme der Schwere nach den Polen zu berechnen, wie er allein durch die Polabplattung der Erde selbst hervorgerufen würde, wenn man im übrigen die Erde als ruhend annimmt. Bei dieser Rechnung darf man aber nicht für die verschiedenen Breiten die Schwere umgekehrt proportional dem Quadrate des Abstandes vom Erdmittelpunkte setzen, da bei einem Sphäroid nicht mehr die Gesamtmasse als im Mittelpunkte vereinigt gedacht werden darf. In diesem Falle muß vielmehr die Rechnung unter genauer Berücksichtigung der Sphäroidgestalt durchgeführt werden. Hierbei ergibt sich, daß die Zunahme der Schwere vom Aequator nach den Polen zu, wie sie nur durch die Abplattung selbst bei ruhend gedachter Erde veranlaßt würde, ebenfalls proportional $\sin^2\varphi$ verläuft. Ferner ergibt sich unter Zugrundelegung des Helmertschen Wertes für die Abplattung der Erde, daß in diesem Falle die Erdschwere an den Polen um $^1/_{552}$ größer sein müßte als am Aequator.

Hiermit sind jetzt alle Daten gegeben, um die wirkliche Abhängigkeit der Schwere von der geographischen Breite berechnen zu können. Kombiniert man nämlich die beiden Einflüsse: schwächende Wirkung der Zentrifugalbeschleunigung auf die Erdschwere und Aenderung der Erdschwere infolge Abplattung der Erde, so ergibt sich die Beziehung:

$$g_{\varphi,0} = g_{0,0} \cdot (1 + \frac{1}{289,5} \sin^2\varphi) \cdot (1 + \frac{1}{552} \sin^2\varphi)$$

oder auch

$$g_{\varphi,0} = g_{0,0} \cdot (1 + \frac{1}{190} \sin^2\varphi). \quad . \quad . \quad (9)$$

In der Tat stimmt diese Gleichung mit den tatsächlich beobachteten Werten ziemlich gut überein, soweit keine lokalen Störungen vorliegen. Wenn wir allerdings die Resultate der vergleichenden Schweremessungen betrachten, wie sie in neuester Zeit an den verschiedensten Punkten der Erde mit den vervollkommneten Pendelapparaten und unter äußerster Präzision ausgeführt wurden, so erkennen wir, daß immerhin nicht alle beobachteten Normalwerte der obigen Gleichung (9) in befriedigender Weise genügen. Vielmehr haben sich in zahlreichen Fällen ganz deutlich meßbare Differenzen ergeben, welche uns zeigen, daß die oben angenommene Gestalt des terrestrischen Ellipsoides doch nur eine Idealform der Erde darstellt, von der die tatsächliche Oberfläche zwar nur sehr minimal, aber doch in deutlich erkennbarer Weise abweicht.

Um nun die tatsächliche, den experimentellen Ergebnissen entsprechende Form der Erdoberfläche zu definieren, pflegt man die Niveaufläche des freien, nur der Schwerkraft unterworfenen Meeres zu betrachten, indem man letzteres als ruhend annimmt, so daß von der Bewegung durch Ebbe und Flut, durch Winde und andere Meeresströmungen erzeugenden Ursachen abgesehen wird. Diese ideelle Meeresfläche würde dann den sichtbaren Teil einer Niveaufläche bilden. Man nennt sie die mathematische Erdoberfläche oder (nach Listing, 1872) das Geoid[1]), im Gegensatz zur realen, der physischen Oberfläche. Durch ein System von Kanälen, die von den Meeresküsten ins Innere der Kontinente gezogen würden, könnte man sich auch hier die Niveaufläche des Geoids sichtbar gemacht denken.

Mathematisch betrachtet ergibt das Geoid ebenfalls eine Rotationsfläche, in erster Annäherung symmetrisch zum Aequator, mit der Erdachse als Drehachse. Im übrigen aber setzt sich dasselbe zusammen aus Flächenstücken größerer und geringerer Krümmung, die stetig ineinander übergehen. Hierbei ist das Geoid mitten auf den großen Meeresflächen etwas tiefer als das Erdellipsoid gelegen, dagegen steigt das Geoid nach den Kontinenten zu an und erhebt sich auf denselben über das terrestrische Ellipsoid hinaus. Diese Abweichungen zwischen Geoid und Erdellipsoid halten sich allerdings immer zwischen engen Grenzen, so findet man in Europa im Maximum Abstände von ca. 15 bis 20 m, in Asien und Amerika vielleicht bis zu 50 m. Andererseits nimmt auch die Größe der Senkung auf den Ozeanen nirgends größere Werte an, so daß im ganzen die Abweichungen des Geoids vom Erdellipsoid kaum 200 m überschreiten dürften.[2])

[1]) Die verschiedenen Autoren stimmen übrigens im Gebrauch dieses Wortes nicht ganz überein.

[2]) Zur Erklärung der beobachteten Anomalien der Erdgestalt sind übrigens auch noch zahlreiche andere Hypothesen ausgesprochen worden, die sich auf die Dauer jedoch nicht als stichhaltig

Aus den zahlreichen Messungen, welche speziell in den letzten Jahrzehnten mit immer mehr verfeinerten Hilfsmitteln ausgeführt wurden und uns so die wahre Gestalt der Erde erkennen ließen, hat man nun empirische Formeln für die Abhängigkeit der **normalen** Schwere von der geographischen Breite aufgestellt. Dabei ist der Normalwert $\gamma_{\varphi.0}$ der Schwerebeschleunigung nach der von Helmert angegebenen Kondensationsmethode auf die Niveaufläche des ruhenden Meeres bezogen. Die Theorie ergibt für die normale Schwere in Meereshöhe in Abhängigkeit von der geographischen Breite φ einen Ausdruck von der Form

$$\gamma_{\varphi.0} = \gamma_{0,0}(1 + \mathfrak{b}_2 \sin^2\varphi + \mathfrak{b}_4 \sin^4\varphi)$$
$$= \gamma_{0,0}(1 + \mathfrak{b}\sin^2\varphi - \frac{1}{4}\mathfrak{b}_4 \sin^2 2\varphi) \quad (10)$$

worin $\mathfrak{b} = \mathfrak{b}_2 + \mathfrak{b}_4$ die Summe zweier Konstanten darstellt, die von der Schwerkraft am Aequator und am Pole abhängig sind.

Die beiden Konstanten $\mathfrak{b}$ und $\mathfrak{b}_4$ hat nun Helmert (1901) aus dem umfangreichen Beobachtungsmaterial berechnet, welches durch die umfassenden Arbeiten der „Internationalen Erdmessung" in den letzten Jahren an den verschiedensten Orten der Erde geschaffen wurde. Dabei fanden allerdings nur die Beobachtungen von Festland- und Küstenstationen Berücksichtigung, da auch das Kondensationsverfahren für **kleine** Inseln der **Tiefsee** keine sichere Reduktion zu bieten vermag. Dieses Verfahren wurde durch das reiche zur Verfügung stehende Material ermöglicht. Auf diese Weise erhielt dann Helmert, indem er bei seiner neuesten, 1910 durchgeführten Rechnung allen vergleichenden Schweremessungen als Fundamentalwert den in Potsdam gefundenen **absoluten** Wert der Schwerebeschleunigung zugrunde legte, für die **normale** aus zahlreichen Beobachtungen abgeleitete mittlere Schwerebeschleunigung der Kontinente und Küsten, nach der Kondensationsmethode auf Meeresniveau reduziert, folgenden Ausdruck:

$$\gamma_{\varphi.0} = 978{,}028 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$$
$$\cdot(1 + \underset{\pm 13}{0{,}005300} \sin^2\varphi - \underset{\pm 13}{0{,}000002} \cdot \sin^2 2\varphi) \quad (11)$$

---

erwiesen. So nehmen z. B. G. Th. Schubert und Clarke ein Ellipsoid mit drei ungleichen Achsen, also elliptischem Aequator, an. Sehr interessant ist weiterhin die von verschiedenen Forschern vertretene Ansicht, wonach der Erde eine tetraedrische Gestalt zuzuschreiben wäre (Lowthian, 1875: Reguläres Tetraeder bezw. Hexakistetraeder; Gregory, 1901: Tetraeder, auf dessen Flächen je eine dreiseitige Pyramide aufsitzt; M. Bertrand, 1900: Zwei Tetraeder, eins für die nördliche und eins für die südliche Erdhälfte).

Wenn man dagegen nur die Konstante $\mathfrak{b}$ nach der obigen Methode als Unbekannte aus den Versuchsdaten berechnet und für die Konstante $\mathfrak{b}_4$ denjenigen Wert einführt, den E. Wiechert und G. H. Darwin unter der Voraussetzung einer hydrostatischen Schichtung des Erdinnern berechnet haben, so erhält man nach Helmert (1910) die folgende Beziehung

$$\gamma_{\varphi.0} = 978{,}030 \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$$
$$\cdot(1 + \underset{\pm 12}{0{,}005302} \sin^2\varphi - 0{,}000007 \sin^2 2\varphi) \quad (11a)$$

entsprechend einer Abplattung $\mathfrak{a} = 1 : 298{,}3 = 0{,}003353$ bei $\mathfrak{a} = 6378200$ m und $\mathfrak{c} = 0{,}0034678$ (Verhältnis der Zentrifugal- zur Schwerebeschleunigung am Aequator).

Die Normalwerte der Formel (11) bezw. (11a) gelten also für Meeresniveau. Will man die normale Schwere in der Höhe H über dem Meere bestimmen, so hat man den obigen Wert von $\gamma_{\varphi.0}$ noch mit $\left(1 - 2\frac{H}{R}\right)$ zu multiplizieren (vgl. Abschnitt 7). Streng genommen muß aber auch bei dieser Reduktion auf Meeresniveau die wahre Gestalt der Erde berücksichtigt werden, während wir oben bei der diesbezüglichen Ableitung in Abschnitt 7 in erster Annäherung die Erde als eine Kugel betrachteten. Die exakte Theorie führt nach Helmert zu der folgenden Beziehung:

$$\gamma_{\varphi.H} = \gamma_{\varphi.0}[1 - \frac{2H}{\mathfrak{a}}(1 + \mathfrak{a} + \mathfrak{c} - 2\mathfrak{a}\sin^2\varphi)] \quad (12)$$

Setzt man hierin $\frac{1}{\mathfrak{a}} = \left(1 - \frac{\mathfrak{a}}{3}\right) : R$ und $\gamma_{\varphi.0} = \gamma_{45°0}\,(1 - \frac{1}{2}\mathfrak{b}\cos 2\varphi) = \gamma_{0.0}\left(1 + \frac{\mathfrak{b}}{2}\right)(1 - \frac{1}{2}\mathfrak{b}\cos 2\varphi)$, wo a und b den äquatorialen bezw. polaren Halbmesser der Erde bedeuten, so ergibt sich

$$\gamma_{\varphi.H} = \gamma_{\varphi.0} - \gamma_{45°0} \cdot \frac{2H}{R}[1 + \frac{1}{6}\mathfrak{c} + \frac{1}{3}\mathfrak{b} + \left(\frac{5}{2}\mathfrak{c} - \frac{3}{2}\mathfrak{b}\right)\cos 2\varphi] \quad \ldots \quad (13)$$

und in Zahlen:

$$\gamma_{\varphi.H} = \gamma_{\varphi.0} - 0{,}3086 \text{ cm } (1 + 0{,}00071 \cos 2\varphi). \quad (H \text{ in km}) \quad \ldots \quad (13a)$$

Das Glied mit $\cos 2\varphi$ ist so klein, daß man es weglassen kann. Diese Rechnung ist dann immerhin noch genauer als jede andere der üblichen Näherungsrechnungen. Für $\gamma_{\varphi.0}$ ist dann der Ausdruck (11) bezw. (11a) zu substituieren.

Von diesen Normalwerten der Schwerkraft ausgehend kann man nun bei den weitaus meisten Betrachtungen an Stelle der Geoidfläche mit genügender Annäherung eine andere regel-

mäßigere Fläche zugrunde legen, das sogenannte Niveau- oder Normalsphäroid. Die Konstanten des letzteren werden so angenommen, daß für dasselbe die normale Schwere gültig ist. Dieses Normalsphäroid, das einer algebraischen Fläche 14. Ordnung entspricht, ist aber andererseits auch nicht sehr verschieden von dem der Erdgestalt sich möglichst anschließenden terrestrischen Ellipsoid. Bruns und Helmert haben auf zwei verschiedenen Wegen gezeigt, daß sich die beiden Flächen des Normalsphäroids und des Erdellipsoids im Maximum nur um 19 bezw. 13 m voneinander unterscheiden. Wir können also jetzt für die Erdgestalt in erster Annäherung eine Kugelfläche, in zweiter Annäherung ein abgeplattetes Rotationsellipsoid, in dritter Annäherung das Normalsphäroid und schließlich in letzter Annäherung das Geoid zugrunde legen.

In der folgenden Tabelle sind die Abmessungen der Erde zusammengestellt, wie sie von verschiedenen Forschern auf Grund der neueren Messungen berechnet wurden. Die beiden ersten Kolumnen enthalten die Elemente der terrestrischen Ellipsoide von Bessel und Clarke in absoluten Einheiten. Nach den letzten Arbeiten des Zentralbureaus der Internationalen Geodätischen Gesellschaft muß man, für Europa wenigstens, die Abplattung sehr nahe dem von Bessel oder Helmert berechneten Werte annehmen, dagegen den äquatorialen Halbmesser sehr nahe dem Werte von Clarke. Diese Zahlen sind in der Tabelle fett gedruckt.

Werte von	Terrestrisches Ellipsoid		Normalsphäroid	Geoid
	Nach Bessel (1841)	Nach Clarke (1880)	Nach Helmert (1910)	Nach Helmert (1907)
a (äquatorialer Halbmesser)	637739715	**637824917**	637739715	**637820000**
b (polarer Halbmesser)	635607896	635651499	635601802	635681817
$\alpha = \frac{a-b}{a}$ (Abplattung)	**1:299,1528**	1:293,4663	**1:298,3**	**1:298,3**
$\varepsilon = \sqrt{\frac{a^2-b^2}{a^2}}$ (Exzentrizität)	0,081696831	0,082483217	0,081813142	0,081813334
$R = a\left(1-\frac{\alpha}{3}\right)$ (Radius einer Kugel gleichen Volumens)	637029109	637100444	637027077	637107273

10. Clairautsches Theorem. Im Anschluß an die Erörterungen des vorigen Kapitels sei noch auf eine sehr einfache und interessante Beziehung hingewiesen, welche Clairaut 1738 zwischen der Schwerebeschleunigung, der Zentrifugalbeschleunigung am Aequator und der Abplattung der Erde aufgestellt hat, wobei alle vorkommenden Größen auf die Niveaufläche des Meeres bezogen sind. Diese unter dem „Theorem von Clairaut" bekannte Beziehung lautet:

$$\frac{g_{90}-g_0}{g_0} + \alpha = \frac{5}{2}\,c + Gl_4 \quad . \quad . \quad (14)$$

Hierin bedeuten Gl_4 Glieder vierter Ordnung, von denen normalerweise abgesehen werden kann; c ist das Verhältnis der Zentrifugal- zur Schwerebeschleunigung am Aequator:

$$c = \frac{\gamma_z}{g_{0.0}} = 0{,}0034678 \text{ (Helmert 1910).}$$

11. Verteilung der Schwere auf der Erdoberfläche. Massenüberschuß, Massendefekt. Unter Benutzung der Helmertschen Formel (11a) sind wir nun imstande, die Verteilung der normalen Schwere $\gamma_{\varphi.0}$ im Meeresniveau der Erde anzugeben. Diese Werte beziehen sich indessen auf die ideale Erdform des Geoids. Es müssen daher offenbar infolge der unregelmäßig verteilten Anomalien in Gestalt und Massenverteilung der Erde die tatsächlich beobachteten Werte $g_{\varphi.0}$ von diesen Normalwerten sehr oft mehr oder weniger stark abweichen. Wir sind so in der Lage, aus der jeweiligen Größe $(g_{\varphi.0}-\gamma_{\varphi.0})$ dieser lokalen Abweichungen sogar direkt einen Anhalt über den Aufbau der Erdkruste zu gewinnen. Hierbei ist man nun, speziell durch die sorgfältigen Pendelmessungen der letzten Jahre, welche jetzt für etwas mehr als 3000 verschiedene Stationspunkte vorliegen, zu äußerst wertvollen Erkenntnissen gelangt, deren Besprechung zwar im einzelnen hier nicht durchgeführt werden kann, auf die aber doch in kurzen Umrissen hingewiesen sei.

Es hat sich nämlich gezeigt, daß auch für die meisten Abweichungen der tatsächlichen Schwerewerte von den normalen Werten ganz bestimmte Gesetzmäßigkeiten obwalten: So wird fast durch-

weg über den kontinentalen Gebirgsmassiven ein zu kleiner Wert der Schwere gefunden. Im übrigen ist dieselbe im Innern der Kontinente im allgemeinen normal. In den Küstenzonen und der anschließenden Flachsee ist die Schwere übernormal, weiterhin beim Uebergang zur Tiefsee, wo der Abfall der Kontinentalsockel stattfindet, wird sie dagegen unternormal. Auf dem offenen Ozean (Tiefsee) herrscht sozusagen normale Schwere, entsprechend den Werten der Helmertschen Formel, doch existieren auch hier lokale Störungsgebiete, indem z. B. in der Nähe der Tiefseegräben die Schwere zu kleine Werte annimmt. Schließlich wird auf den Inseln der Tiefsee, im Gegensatz zu den Kontinenten, ein bedeutend zu großer Wert der Schwere beobachtet.

Man pflegt nun in solchen Fällen, wo die Schwere sich größer als normal erwiesen hat, von einem daselbst vorhandenen Massenüberschuß zu reden, dagegen von einem Massendefekt, wenn die beobachtete Schwere unterhalb des zu erwartenden Normalwertes liegt. Hiermit soll jedoch über die wirkliche Massenverteilung an dem betreffenden Orte keine Aussage gemacht werden. Die Differenz zwischen dem beobachteten und dem normalen Werte der Schwerebeschleunigung wird umgerechnet auf die äquivalente Dicke (m) einer unter dem Beobachtungsorte in Meeresniveau gedachten Massenschicht, durch deren Vorhandensein bezw. Fehlen die gefundene Schwereanomalie sich erklären ließe. Hierbei wird eine mittlere Dichte von 2,4 in Rechnung gebracht und bei der Reduktion auf Meeresniveau die Kondensationsmethode zugrunde gelegt. Massenüberschuß und -defekt werden also nur als ideale Schicht in Meereshöhe berechnet.

Die ersten Beobachtungen der oben beschriebenen Schwereanomalien wurden von Sterneck zu Anfang der neunziger Jahre gemacht. Er fand, daß in den Tiroler Alpen und den angrenzenden Gebirgen die Schwere einen zu kleinen Wert ergibt. Später zeigte sich bei den ausgedehnten Untersuchungen des ganzen Alpenmassivs, daß der daselbst überall beobachtete Massendefekt in den Tiroler Gebieten seinen maximalen Wert in einer Stärke von 1500 m erreicht, doch auch im Engadin und in den westlicheren Schweizer Alpen wurden zum Teil sehr große Werte beobachtet, so fand Messerschmitt im Gebiete des Gotthardmassivs einen Defekt von 1200 m.

Analoge Beobachtungen wurden seitdem an den verschiedensten Punkten der Erde gemacht. Im Jura, im Schwarzwald, in Böhmen, im Kaukasus, in Indien, Afrika, Amerika, überall fand sich über den Gebirgsmassiven ein deutlich meßbarer Massendefekt.

Wegen der beobachteten Schwereanomalien, wie sie über der Flach- bezw. Tiefsee gefunden wurden, sei auf die Arbeiten von Schiötz und speziell auch auf die neueren Messungen Heckers (vgl. auch Abschnitt 6) verwiesen. Im übrigen vergleiche man wegen weiterer Einzelheiten den besonderen Artikel „Gebirgsbildung". Daselbst finden sich auch die verschiedenen Hypothesen[1]), welche man zur Erklärung dieser höchst interessanten Gesetzmäßigkeiten aufgestellt hat, insbesondere auch diejenige vom statischen Gleichgewicht der ganzen Erdkruste, die nach dem heutigen Stande unserer Erkenntnisse wohl die meiste Beachtung verdient.

Außer den bisher nur erwähnten ganz gesetzmäßigen Schwereanomalien existieren nun auch noch manche Schwerestörungen, die einen rein lokalen, speziellen Charakter haben. So ist z. B. die zu geringe Schwere bei Berlin, bei Langenberg und an anderen Stellen der norddeutschen Tiefebene höchst wahrscheinlich durch große unterirdische Salz- und Gipslager zu erklären, die ja einerseits eine etwas geringere Dichte (nur 2,15) aufweisen, als sie im Durchschnitt der Erdkruste (normal 2,5 und mehr) zukommt, und andererseits wegen ihrer großen Löslichkeit sehr leicht zur Bildung von unterirdischen Hohlräumen Veranlassung geben. Ferner ergibt sich z. B. im Harz ein Schwereüberschuß gegenüber seiner Umgebung, der auf das Vorhandensein spezifisch schwererer Gesteine (besonders Diabase) zurückzuführen ist.

12. Anomale Lotablenkungen durch spezifisch schwere Gesteine und durch Hohlräume. Es ist eine bekannte Tatsache, daß die Richtung des Lotes in der Nähe großer Berge bezw. Gebirge abgelenkt wird. Diese Abweichung beträgt z. B. in Ilsenburg, am Fuße des Harzes, 10″,8, bei Wladikawkas, am Fuße des Kaukasus sogar 35″,8; auch die Cheopspyramide bewirkt schon eine solche. Wir werden weiter unten sehen, wie man imstande ist, aus der Größe dieser Lotablenkungen und auf Grund einer schätzungsweisen Annahme der Masse des anziehenden Bergmassivs die Masse der ganzen Erde zu berechnen. Im vorliegenden Abschnitt soll nur gezeigt werden,

[1]) Eine umfassende Zusammenstellung dieser Hypothesen findet sich auch bei Messerschmitt: Die Schwerebestimmung an der Erdoberfläche. Sammlung „Die Wissenschaft", Braunschweig, Fr. Vieweg, 1908. Ferner sei ganz besonders auf Helmert verwiesen, welcher in der Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften Bd. VI, 1B, Heft 2, eine eingehende tabellarische Zusammenstellung des wichtigsten Beobachtungsmaterials gegeben hat.

wie man aus der Größe und Richtung einer anomalen Lotablenkung unter Umständen auch einen Schluß auf den inneren Aufbau des Bergmassivs machen kann.

Normalerweise wird am Fuße eines Berges bezw. Gebirges die maximale Lotablenkung beobachtet. Diese nimmt bei Besteigung des Berges allmählich ab, auf dem Gipfel wird sie gleich Null, und beim Abstieg auf der anderen Seite müssen dann in steigendem Maße Ablenkungen des Lotes in der entgegengesetzten Richtung auftreten. Solche Verhältnisse liegen z. B. am Meißner bei Kassel vor.

Ganz anders aber gestaltet sich der Verlauf der Lotablenkungen z. B. im Harz, wenn man von Ilsenburg aus den Brocken, den höchsten Punkt des ganzen Gebirges, in nordsüdlicher Richtung übersteigt. In Figur 4 sind die Werte der Lotablenkungen eingetragen, wie sie K. Lossen durch zahlreiche Beobachtungen festgestellt hat; dabei sind die Ablenkungen auf der Nordseite des Gebirges als positiv und die entgegengesetzt gerichteten auf der Südseite als negativ bezeichnet. Hiernach beträgt die Lotablenkung in Ilsenburg, unmittelbar am Fuße des Gebirges, + 10″,8. Auf dem Brockengipfel aber ist sie nur wenig kleiner, nämlich + 9″,2, und erst 4 Stunden weiter südlich, bei Hohegeiß, wurde ein negativer Wert von — 1″,3 beobachtet. Diese negative Ablenkung nimmt dann nach Süden noch weiter zu, erreicht aber in Tettenborn, am Südrande des Harzes, erst einen Wert von — 5″,0, also dem absoluten Werte nach nur einen rund halb so großen Wert wie bei Ilsenburg. Der Nullpunkt der Lotablenkungen liegt mithin durchaus nicht im höchsten Punkt des Gebirges, oben auf dem Brocken, sondern erheblich südlicher, nicht weit vor Hohegeiß.

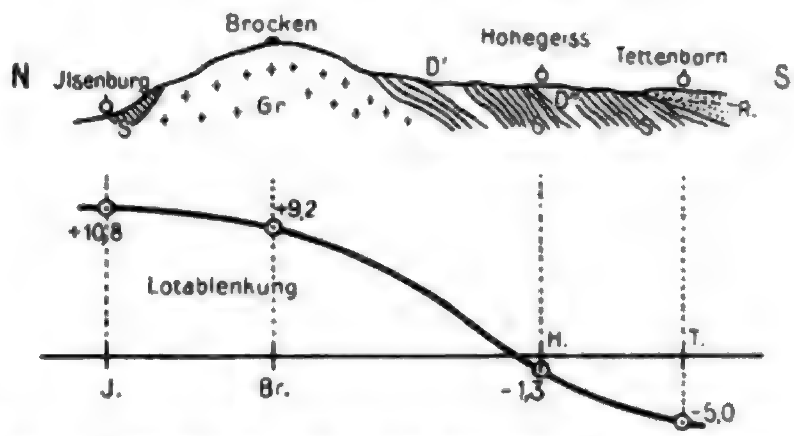


Fig. 4. Oberer Teil derselben nach Emanuel Kayser. Durchschnitt von Ilsenburg nach dem Südrande des Harzes. Gr. Granit, S. Schiefergebirge, D′ und D″ Diabaszüge, R. Rotliegendes.

Dieses anomale Verhalten der Lotablenkungen findet seine Erklärung, sobald wir den geologischen Aufbau des Gebirges näher betrachten, wie er auch in der kleinen Skizze (Fig. 4) wiedergegeben ist. Wir ersehen hieraus, daß dem Granitmassiv des Brockens im Süden zwei Diabaszüge vorgelagert sind, deren Dichte den relativ großen Wert von 2,9 bis 3,0 erreicht, und ohne Zweifel ist hierin die Ursache der beobachteten Anomalie der Lotablenkungen zu suchen. Man erkennt ja ohne weiteres, wie die Lage der Diabaszüge durch ihre relativ größere Massendichte den Nullwert der Lotabweichungen in der oben geschilderten Weise verschieben muß. Daß diese Erklärung richtig, ergibt sich übrigens auch noch weiterhin aus dem Verlaufe, den die Nulllinie der Lotablenkungen in anderen Teilen des Harzes nimmt; dieselbe folgt nämlich vom Brocken ostwärts keineswegs der Längsachse des ganzen Gebirges, vielmehr wandert sie zusammen mit den Diabaszügen schräg durch den ganzen Gebirgsstock hindurch.

Wir haben also ein typisches Beispiel dafür, wie durch das Auftreten spezifisch relativ dichter Gesteine die Größe und Richtung der Lotablenkungen in weiten Grenzen beeinflußt werden kann, und wie man andererseits aus dem Verhalten des Lotes unter Umständen direkt einen Aufschluß über den inneren Aufbau eines Gebirges gewinnen kann. Uebrigens müssen solche Lotabweichungen ganz allgemein überall dort auftreten, wo um den Beobachtungspunkt herum eine Asymmetrie der Gestalt oder Massenverteilung vorhanden ist, so z. B. außer in der Nähe von Bergen und Gebirgen auch in der Nähe von Meeresküsten. Andererseits müssen auch Hohlräume im Innern der Erdkruste sich unter Umständen durch die Richtung des Lotes bemerkbar machen, und zwar derart, daß sie eine scheinbare Abstoßung desselben hervorrufen. Solche Abstoßungen des Lotes wurden in der Tat schon des öfteren beobachtet, so zuerst durch Stebnitzki am Südrande des Kaukasus, später (1864) durch Schweizer bei Moskau, ferner bei Pisa, bei Berlin usw., und man nimmt heute allgemein an, daß die Ursache dieser scheinbaren Lotabstoßungen in dem Vorhandensein unterirdischer Hohlräume zu suchen ist.

Alle diese beobachteten Anomalien der

Lotablenkung haben übrigens ihre Parallele in den Werten, welche die exakten Pendelmessungen ergeben haben, aus deren Verhalten man, wie oben schon gezeigt wurde, in noch weit höherem Maße einen Aufschluß über die Konstitution der Erdrinde erhalten kann.

13. Gezeiten. Zu den lokalen Abweichungen, welche die physische Erdoberfläche gegenüber der Idealform des Geoids aufweist, gehören auch die periodischen Hebungen und Senkungen der Meeresoberflächen, wie sie durch die Attraktionskraft des Mondes in Ebbe und Flut hervorgerufen werden. Näheres hierüber s. in dem besonderen Artikel „Gezeiten".

14. Methoden zur Bestimmung der Gravitationskonstante G und der mittleren Erddichte Δ. Eine Masse m, welche sich auf der Oberfläche der Erde befindet, wird von letzterer mit einer Kraft m.g angezogen, welche nach dem Newtonschen Attraktionsgesetze in erster Annäherung durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$m \cdot g = G \cdot \frac{M \cdot m}{R^2} = \frac{4}{3} R \pi \Delta m G, \quad (15)$$

wenn G die Gravitationskonstante, M die Masse der Erde, R deren Radius und Δ deren mittlere Dichte bezeichnet.

Eine genauere Betrachtung, welche auch die Abplattung und die Verteilung der Zentrifugalkräfte auf der Erde berücksichtigt, führt — unter Benutzung des Theorems von Clairaut — in der von Richarz und Krigar-Menzel auseinandergesetzten Weise zu der Beziehung:

$$978{,}030 \frac{cm}{sec^2} = \frac{4}{3} \cdot b \cdot \pi \cdot \Delta \cdot G [1 + a - \frac{3}{2} c] \quad (16)$$

Hierin bedeutet b den polaren Halbmesser der Erde (635 681 817 cm) und $c = \frac{\gamma_z}{g_{0.0}}$ das Verhältnis der Zentrifugal- zur Schwerkraft am Aequator (= 0,0034678; Helmert 1910).

Die Kenntnis der Gravitationskonstante G ermöglicht uns also, die mittlere Dichte Δ und damit die Masse M der Erde zu berechnen. Ist letztere bekannt, so ergibt sich weiterhin auf Grund astronomischer Beobachtungen auch die Masse der übrigen Planeten und der Sonne.

Die Methoden zur Bestimmung der Gravitationskonstante bezw. der mittleren Erddichte lassen sich in drei Gruppen einteilen: I. wurde mittels Lotes oder durch Pendelbeobachtungen die Veränderung gemessen, welche in der Richtung bezw. Größe der Erdbeschleunigung durch bekannte Erdmassen hervorgerufen wird (terrestrische Versuche); II. wurde mittels Drehwage, Doppelpendel oder gewöhnlicher Wage direkt die Kraft gemessen, welche bekannte Massen in gegebener Entfernung aufeinander ausüben (Laboratoriumsversuche); III. hat man auch versucht, theoretisch die mittlere Erddichte aus derjenigen an der Erdoberfläche zu berechnen auf Grund eines hypothetischen Gesetzes über die Zunahme der Dichte nach dem Erdinnern. Daß diese letztere theoretische Methode keinen Anspruch auf große Genauigkeit machen kann, ist ohne weiteres klar; es sollen daher im folgenden nur die beiden ersten Meßmethoden noch weiter besprochen werden, obwohl auch auf diesem letzteren Gebiete eine sehr umfangreiche Literatur erschienen ist.

Ia) Lotmessungen. Hier bilden möglichst isoliert stehende Berge die ablenkenden Massen, deren Größe geschätzt werden muß. Um die Lotablenkung zu ermitteln, wählt man zwei Punkte auf demselben Meridian, den einen nördlich und den anderen südlich vom ablenkenden Bergmassiv. Man bestimmt dann den Unterschied in der geographischen Breite beider Beobachtungsstationen, zunächst trigonometrisch und dann noch astronomisch aus der Polhöhe. In der letzteren Messung ist die jeweilige Richtung des Lotes enthalten, wie aus nebenstehender

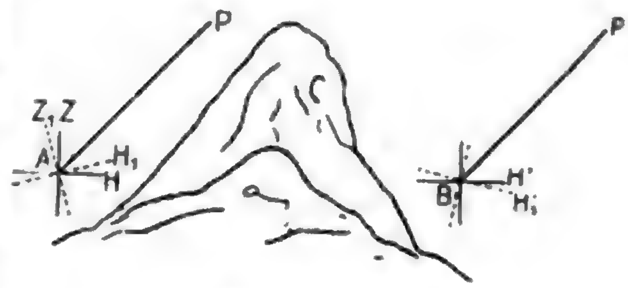


Fig. 5. Nach O. Chwolson.

Figur 5 verständlich. Die Differenz dieser beiden Bestimmungen liefert den doppelten Betrag der durch die Bergmasse hervorgerufenen Lotablenkung.

Nach dieser Methode arbeiteten Bouguer (1749) am Chimborazo, Maskelyne und Hutton (1775, $\Delta = 4{,}8$), später James und Clarke (1885, $\Delta = 5{,}32$) am Berge Arthurs Seat in Schottland, Pechmann (1864) in den Alpen und Preston (1887, $\Delta = 5{,}13$) am Berge Habakap des Hawaiarchipels.

Ib) Pendelmessungen. Bestimmt man die Erdbeschleunigung am Fuße und auf der Spitze eines Berges oder an der Oberfläche und im Innern der Erde (vgl. Abschnitt 8), so ergibt die Differenz der Meßresultate in beiden Fällen ein Maß für die Anziehung der über dem jeweiligen unteren Beobachtungspunkte vorhandenen Erdmassen. Messungen der ersten Art wurden ausgeführt von Bouguer (1749) in den Cordilleren, von Carlini (1824, $\Delta = 4{,}84$) am Mont Cenis, von Mendenhall (1880, $\Delta = 5{,}77$) auf dem japanischen Vulkan Fusijama und von Preston (1892, $\Delta = 5{,}13$) auf dem Berge Manna Kea der Hawaiinseln. Messungen der zweiten Art hat Drobisch (1856) vorgeschlagen, ausgeführt wurden solche von Airy (1857,

$\Delta = 6{,}57$), von Haughton ($\Delta = 5{,}48$) und von Sterneck (1882/86, $\Delta = 5{,}52$).

IIa) Messungen mit der Drehwage. Hier sind zwei Methoden möglich, eine statische und eine dynamische. Nach der ersten Art wird durch den Torsionswinkel die Kraft gemessen, mit welcher zwei neben der Drehwage befindliche Massen, die an den Enden des Wagebalkens befestigten Massen anziehen. In dieser Weise arbeitete zuerst Cavendish (1798, $\Delta = 5{,}45$). Huttons Revisionsrechnung ergab $\Delta = 5{,}32$. Die Abmessungen seines Apparates waren sehr groß. An den Enden des Wagebalkens von 6 Fuß Länge befanden sich zwei Bleikugeln von je 730 Gramm Masse. Diesen letzteren wurden dann zwei große Bleikugeln von 12 Zoll Durchmesser seitlich genähert, und zwar, wie aus Figur 6 ersichtlich ist, einmal

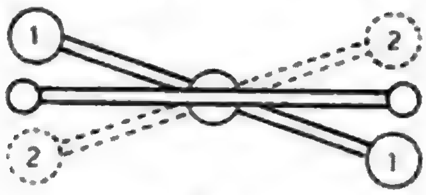


Fig. 6.

in Stellung 1..1 und bei einer zweiten Messung in Stellung 2...2. Später führte Reich (1837 bis 1852, $\Delta = 5{,}58$) analoge Messungen unter Verwendung einer bifilaren Aufhängung aus. Weiterhin wurde mit der Torsionswage gearbeitet von Baily (1842, $\Delta = 5{,}67$), Cornu und Baille (1870/78, $\Delta = 5{,}56$), Boys (1893, $\Delta = 5{,}527$) und C. Braun (1896, $\Delta = 5{,}52725$). Hierbei wurde die Ausführung der Methode immer mehr verfeinert, alle nur erdenklichen Vorsichtsmaßregeln wurden beobachtet und die neuesten und exaktesten Meßverfahren in Anwendung gebracht. Gleichzeitig ging man auch zu bedeutend kleineren Dimensionen über. Um die Erschütterungen auszuschließen, welche mit der Lagenänderung (1,2) der schweren Kugeln unvermeidlich verbunden sind, brachten Cornu und Baille in den Stellungen 1..1..2..2 feststehend vier gußeiserne Hohlkugeln an, die abwechselnd in der Stellung 1..1 bezw. 2..2 mit Quecksilber gefüllt wurden. Die Umfüllung geschah durch Röhren. In diesem Falle waren die großen gravitierenden Massen 12 kg schwer, die kupfernen Kugeln an der Drehwage dagegen nur je 109 g. Boys ging in der Reduzierung auf kleinen Maßstab noch weiter vor, so daß er zur Aufhängung die von ihm erfundenen Quarzfäden benutzen konnte. Die großen Bleikugeln hatten einen Durchmesser von $4^1/_4$ bezw. $2^1/_4$ Zoll, die Durchmesser der Goldkugeln am Balken betrugen 0,2 bezw. 0,25 Zoll. Schließlich brachte Braun, der übrigens wieder vier Hohlkugeln mit abwechselnder Quecksilberfüllung verwandte, noch eine weitere Verbesserung an, indem er seine ganzen Messungen in einem ziemlich hohen Vakuum ausführte. Hierdurch wurde die schlimmste Störung, der Einfluß von Luftströmungen, vermieden. Die Masse seiner kleinen Kugeln betrug 55 g.

Bei der dynamischen Methode werden die großen gravitierenden Massen in der Verlängerung des Wagebalkens aufgestellt; hierdurch vergrößert sich die Direktionskraft der Aufhängung, und entsprechend nimmt die Schwingungsdauer ab. Braun erhielt nach diesem Verfahren einen Wert, welcher mit seinem nach der statischen Methode erhaltenen Resultat sehr gut übereinstimmt. v. Eötvös (1896, vorläufige Messung: $\Delta = 5{,}545$) hat eine Modifizierung dieses Verfahrens vorgeschlagen, jedoch bisher noch keine definitiven Resultate veröffentlicht. Schließlich ist noch ein Vorschlag von Burgess (1898, vorläufige Messung: $\Delta = 5{,}55$) zu erwähnen, welcher die Verwendung großer gravitierender Massen, aber dünner Aufhängedrähte dadurch ermöglicht, daß er die Massen auf Quecksilber schwimmen läßt. Definitive Resultate liegen auch hier noch nicht vor.

IIb) Messungen mit dem Doppelpendel. Hier liegt nur eine einzige Arbeit von Wilsing vor (1885/87, $\Delta = 5{,}577$). Er benutzte einen vertikalen Wagebalken, dessen Schwerpunkt nur ca. 0,01 mm unterhalb der Schneide lag. An den Enden dieses Balkens befanden sich zwei Massen von 0,54 kg, welche durch zwei seitlich angebrachte Massen (zwei gußeiserne Zylinder) von je 325 kg angezogen wurden (vgl. Fig. 7). Die Methode ist sehr empfindlich, die beobachtete Winkelablenkung betrug 1 bis 10′. Zudem war der schädliche Einfluß von Luftströmungen sehr gering.

IIc) Messungen mit der gewöhnlichen Wage. Diese Methode, welche von Descartes vorgeschlagen wurde, ist zuerst von Jolly (1881, $\Delta = 5{,}569$) benutzt worden. Er verwendete eine Doppelwage (vgl. Fig. 2) und äquilibrierte zunächst 2 gleiche Massen, von denen sich die erste in einer oberen, die zweite dagegen in der gegenüberliegenden unteren Wagschale befand. Die beobachtete Gewichtsdifferenz ergab die Abnahme der Schwere mit der Höhe entsprechend der Niveaudifferenz der Wagschalen von rund 21 m (vgl. Abschnitt 7). Brachte er nun unter die in der unteren Wagschale befindliche Masse eine große Bleikugel von 5775 kg, so ergab eine neue Aequilibrierung die gegenseitige Anziehung dieser beiden Massen, da bis zur oberen Wagschale die große Bleikugel keine meßbare

Anziehung ausübte. Der große, wesentliche Nachteil dieser Anordnung lag in dem störenden Einfluß vertikaler Luftströme, wie sie durch Temperaturdifferenzen verursacht wurden.

Um diese Fehlerquelle zu beseitigen, verwendete Poynting (1890, $\varDelta = 5{,}493$) eine gewöhnliche Wage, an dessen beiden Enden zwei Kugeln von je 21,57 kg Masse aufgehängt waren. Eine Kugel von 153,41 kg Masse wurde dann mittels Drehtisches abwechselnd unter die eine und unter die andere kleine Kugel des Wagebalkens gebracht. Die hierdurch bewirkte Aenderung in der Ausbalanzierung des Balkens erfolgte durch eine weiter entfernte Kugel, deren Wirkung natürlich berücksichtigt werden mußte. Bei diesem Verfahren ergab sich der große Vorteil, daß



Fig. 7. Doppelpendel von Wilsing. Nach Siegmund Günther.

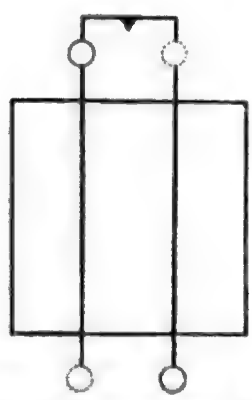


Fig. 8. Doppelwage mit Bleiklotz von Richarz und Krigar-Menzel.

zwischen den einzelnen Messungen keine Arretierung der Wage nötig war. Die Ablenkung des Balkens wurde durch Reflexion eines Lichtstrahles an einem bifilar aufgehängten Spiegel vergrößert, indem der eine Faden fest, der andere dagegen mit dem Wagebalken selbst verbunden war.

Schließlich ist noch über eine neue Versuchsanordnung von Richarz und Krigar-Menzel (1896, $\varDelta = 5{,}507$) zu berichten, an dessen Vorarbeiten auch A. König beteiligt war. Bei derselben wurde wieder eine Doppelwage benutzt, deren vertikaler Schalenabstand 226 cm betrug. Als gravitierender Körper diente ein rechtwinkliger, aus lauter gleichen Barren ($10 \times 10 \times 30$ cm) zusammengefügter Bleiklotz von 200 cm Höhe und 211 cm horizontaler Kantenlänge, also etwas über 100000 kg Masse. Derselbe wurde in dem Raume zwischen den oberen und den unteren Wagschalen aufgebaut, wobei die vertikalen Verbindungsstangen der Schalen in engen, röhrenförmigen Aussparungen mitten durch den ganzen Bleiklotz hindurchgingen. Bei dieser Anordnung befanden sich also, wie auch aus Figur 8 ersichtlich ist, die beiden oberen Wagschalen nahe über und die beiden unteren nahe unter dem Bleiklotz.

Das Prinzip der Messungen, in idealer Ausführung, war nun folgendes. Die ersten Messungen erfolgten ohne den Bleiklotz: eine Kupferkugel von rund 1 kg Masse wurde einmal in der Wagschale links oben durch Gewichte in der Schale rechts unten gewogen, und ein zweites Mal in der Schale links unten durch Gewichte in der Schale rechts oben. Die Differenz dieser beiden Wägungen ergab die doppelte Abnahme der Schwere mit der Höhe (vgl. Abschnitt 7) entsprechend dem vertikalen Schalenabstand von 226 cm.

Nunmehr wurde zu den eigentlichen Gravitationsmessungen der Bleiklotz in der oben angegebenen Form aufgebaut. Durch die Anwesenheit dieser großen anziehenden Masse erscheint die Schwere am Orte der oberen Wagschalen um die Attraktion des Bleies vermehrt, am Orte der unteren Wagschalen um dieselbe vermindert. Die Abnahme der Schwerebeschleunigung von unten nach oben erscheint daher um die doppelte Attraktion vermindert. Zwei ideale Wägungen mit denselben beiden Stellungen der Kilogrammkugel wie oben ergaben daher jetzt statt der doppelten Abnahme des Gewichtes mit der Höhe ein um die vierfache Attraktion des Bleiklotzes vermindertes Resultat. Aus der Vereinigung der Resultate ohne und mit Bleiklotz ergab sich also die reine, vierfache Attraktion des letzteren.

Diese Methode besitzt gegenüber derjenigen Poyntings den Vorteil, daß eine ganz bedeutend größere gravitierende Masse benutzt werden konnte, zudem erscheint die Gravitationswirkung durch die sinnreiche Anordnung noch vervierfacht, so daß hierdurch der geringe Nachteil der Arretierung der Wage, wie er in jeder Versuchsreihe bei der Umlegung der Massen nötig wurde, ganz außer Betracht fällt. Ferner konnten, gegenüber Jollys Apparat, die Manipulationen und Wägungen unter möglichstem Ausschluß aller Luftzug- und Temperatureinflüsse ausgeführt werden, indem bei der praktischen Ausführung der oben skizzierten Methode alle nur denkbaren Vorsichtsmaßregeln getroffen wurden; zudem sind nachher alle nötigen Korrektionen in weitestem Maße in Rücksicht gezogen worden.

15. Ergebnisse der Gravitationsmessungen. Masse der Erde. Vergleicht man die Resultate der verschiedenen Bestimmungen von $\varDelta$, so sieht man, daß dieselben zum Teil beträchtlich differieren. Nun ist

ohne weiteres klar, daß alle nach terrestrischen Methoden ausgeführten Messungen keinen Anspruch auf große Genauigkeit machen können. Hier sind zwar die zu beobachtenden Differenzen relativ groß, doch sind die Größen der gravitierenden Massen nur schätzungsweise bekannt; zudem ist die Massenverteilung innerhalb der Erdkruste unter dem Beobachtungsorte, die doch auch eine wesentliche Rolle spielt, gänzlich unbekannt.

Bei der Frage nach dem wahrscheinlichsten Werte der mittleren Erddichte Δ können also nur die Laboratoriumsversuche Berücksichtigung finden. Doch sind hier die älteren Messungen auch nicht einwandfrei, so daß schließlich nur die neuesten Versuchsresultate übrig bleiben, welche mit vervollkommneten Apparaten und unter Vermeidung aller möglichen Fehlerquellen ausgeführt wurden. Man erhält dann folgende Zusammenstellung:

		Zeit	Δ	G ($cm^3\,g^{-1}\,sec^{-2}$)
Drehwage	Boys	1894	5,5270	$6,658 . 10^{-8}$
	Braun	1896	5,5273	$6,658 . 10^{-8}$
Doppelpendel	Wilsing	1889	5,577	$6,596 . 10^{-8}$
gewöhnliche Wage	Poynting	1891	5,4934	$6,698 . 10^{-8}$
	Richarz u. Krigar-Menzel	1896	5,507	$6,682 . 10^{-8}$

Wie man sieht, ist der Wilsingsche Wert wesentlich größer als alle anderen, obwohl seine Methode den anderen gleichwertig sein dürfte. Im übrigen zeigt sich eine große Uebereinstimmung zwischen denjenigen Resultaten, welche jeweilig nach derselben Methode erhalten wurden, während die Resultate der verschiedenen Methoden stark gegeneinander differieren. Der Grund zu diesen Differenzen scheint demnach in prinzipiellen Fehlern der einzelnen Methoden zu liegen. Bevor diese jedoch nicht klargelegt sind, müssen wir die verschiedenen Methoden wohl als gleichwertig betrachten. Indessen wollen wir bei der Mittelwertbildung dem Wilsingschen Resultate nur ein halb so großes Gewicht wie den vier übrigen Zahlenwerten beilegen, da nach der von ihm benutzten Methode bisher nur die eine Beobachtung vorliegt, und diese durch andere gleichartige Messungen noch keine Bestätigung gefunden hat. Auf diese Weise erhalten wir dann als Mittel für die mittlere Erddichte den Wert $\Delta = 5{,}52$; derselbe wird gegenwärtig auch vom Zentralbureau der Internationalen Geodätischen Gesellschaft als der wahrscheinlichste Wert angenommen. Entsprechend ergibt sich für die Gravitationskonstante der Mittelwert $G = 6{,}667 . 10^{-8}$ absolute Einheiten.

Mit Hilfe des für Δ gefundenen Wertes sind wir jetzt imstande, die Masse M der Erde zu berechnen, indem wir

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 . \Delta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

setzen. Hieraus ergeben sich dann weiterhin durch Vermittelung der Keplerschen Gesetze auch noch die Massen der Sonne, der übrigen Planeten und der Monde. Auf diese Weise erhält man für die Masse der Erde den Wert

$$M = 5{,}99733 . 10^{27} \text{ g.}$$

Die relativen Massen der übrigen Planeten und der Sonne, wie sie sich aus den astronomischen Beobachtungen ergeben, sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Namen der Himmelskörper	Relative Masse (Erde = 1)
Merkur	0,056
Venus	0,817
Erde	1
Mars	0,108
Jupiter	318,36
Saturn	95,22
Uranus	14,58
Neptun	17,26
Sonne	333432
Mond der Erde	0,012

16. Massenverteilung innerhalb der Erde. Der für die mittlere Erddichte gefundene Wert $\Delta = 5{,}52$ erscheint außerordentlich hoch, wenn man damit die mittlere Dichte der uns bekannten Oberflächenschichten[1]) vergleicht, welche mit Rück-

[1]) Von den verbreitetsten kristallinischen Massengesteinen haben die leichteren, wie Granit, Gneis, Quarzporphyr usw. nur eine Dichte von 2,5 bis 2,7; die schwereren wie Basalt, Diabas usw. nur eine solche von höchstens 3,3. Die meisten Sedimentgesteine wie Kalkstein, Sandstein, Tonschiefer usw. sind ebenfalls nicht dichter wie 2,5 bis 2,8. Dasselbe Resultat ergibt sich auch bezüglich der hauptsächlichsten gesteinsbildenden Mineralien: der Quarz hat nur eine Dichte von 2,65 und der Feldspat nur eine solche von 2,56 (nach Emanuel Kayser).

sicht auf die großen Wassermassen der Ozeane höchstens den Wert 2,3 erreichen dürfte. Man muß also annehmen, daß die Dichte der Erde in ihrem Innern wesentlich größer als an der Oberfläche ist. Dabei sind über die Art der Dichteverteilung noch zwei prinzipiell verschiedene Hypothesen möglich: 1. könnte die Erddichte von außen nach innen stetig zunehmen, 2. aber könnte die Erde einen Kern enthalten, der eine bedeutend größere Dichte besitzt, wie seine äußere Umhüllung. Bis vor kurzem wurde ausschließlich die erstere Ansicht vertreten. Laplace, Oekinghaus, Stapff, Tumlirz, Roche und andere haben die verschiedensten Formeln entwickelt, um die Dichte als Funktion des Abstandes vom Erdschwerpunkte — die Erde als homogen geschichtete Kugel betrachtet — auszudrücken. Hierbei ergab sich für den Mittelpunkt ein Dichtigkeitswert zwischen 10 und 13, im Mittel etwa 11,5.

Neuerdings (1897) hat Wiechert eine andere Vorstellung entwickelt, welche der zweiten oben angedeuteten Möglichkeit entspricht. Speziell auf Grund seiner theoretischen Betrachtungen über die Größe der Abplattung der Erde kam er zu dem Schluß, daß dieselbe einen Kern von der Dichte 7,9 bis 8,6 enthalte, dessen Radius gleich rund $^4/_5$ des Erdradius wäre. Der äußere Mantel dieses Kernes, das letzte Fünftel des Erdradius, würde dann noch $^1/_6$ der gesamten Erdmasse enthalten und eine Dichte von 3 bis 3,5 ergeben.

Diese Hypothese hat später eine sehr schöne Bestätigung und direkte Stütze in den Ergebnissen der Erdbebenforschungen gefunden, doch kann hierauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sei nur noch erwähnt, daß der Wiechertsche Erdkern voraussichtlich wohl vorwiegend aus Eisen (Ferrum) und Nickel bestehen dürfte. Süß hat daher für denselben die Abkürzung „Nife“ nach den Anfangsbuchstaben der Hauptbestandteile eingeführt. Der rund 1400 km dicke Mantel, welcher den Eisenkern umgibt, wird von Süß „Sima“ genannt, nach den Hauptkomponenten Silicium und Magnesium. Auf diesem Sima schwimmen dann oben die relativ nur sehr dünnen Kontinentalschollen, welche nach ihren Hauptbestandteilen Silicium und Aluminium als „Sal“ bezeichnet werden und eine mittlere Dichte von etwa 2,5 bis 2,7 besitzen. Mit diesen Vorstellungen haben wir zugleich einen Anschluß an die oben erwähnte Hypothese der Isostasie (vgl. Abschnitt 10).

17. Gültigkeitsgrenzen des Newtonschen Gesetzes.[1]) **Astronomische und experimentelle Prüfung.** Es wird nur wenige physikalische Gesetze geben, deren Prüfung nach allen nur denkbaren Richtungen hin mit einer solchen Exaktheit und Feinheit durchgeführt werden kann, wie gerade diejenige des Newtonschen Gravitationsgesetzes. Ist man doch imstande, dasselbe außer auf experimentellem Wege auch auf astronomischem Gebiet durch Beobachtung der Bewegung der Himmelskörper einer äußerst scharfen Kontrolle zu unterziehen, und gerade hier müßten ja die kleinsten, sozusagen mikroskopischen Abweichungen vom Newtonschen Gesetz schon in merklicher Weise der Beobachtung zugänglich sein.

In der Tat kennt man nun auch in der Astronomie verschiedene Fälle, in denen sich zwischen der Beobachtung und der Berechnung auf Grund des Newtonschen Gesetzes Differenzen ergeben. Diese betragen:

1. in der Perihelbewegung des Merkurs ca. 40″ im Jahrhundert;
2. in der Bewegung des Knotens der Venusbahn: das 5-fache des wahrscheinlichen Fehlers;
3. in der Perihelbewegung des Mars: das 3-fache des wahrscheinlichen Fehlers;
4. in der Exzentrizität der Merkurbahn: das 2-fache des wahrscheinlichen Fehlers (unbestimmt);

ferner wurden noch beobachtet:

5. bedeutende Anomalien in der Bewegung des Enckeschen Kometen, sowie
6. kleine Unregelmäßigkeiten in der Mondbahn.

Alle diese Differenzen sind zwar verhältnismäßig nur äußerst minimal, wenn man bedenkt, daß sich im übrigen aus dem Newtonschen Gesetz nicht nur die Planetenbewegungen in erster Annäherung entsprechend den Keplerschen Gesetzen ergeben, sondern daß auch die Abweichungen von diesen Bahnen infolge der Störungen durch andere Planeten noch mit einer solchen Exaktheit aus diesem Gesetze folgen, daß man auf Grund von beobachteten Bahnstörungen die Bahn und relative Masse des bis dahin unbekannten Neptun vorausberechnen konnte (Leverrier, 1831).

Andererseits haben auf experimentellem

[1]) Hierüber, sowie über die im letzten Kapitel beschriebenen Erklärungsversuche der Gravitation hat Zenneck in der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. V (1), S. 35 bis 67, eine sehr umfassende Abhandlung geschrieben, an welche sich die obigen Zeilen stark anlehnen. Alle Einzelheiten der Darstellung zu bringen würde im Rahmen des vorliegenden Artikels zu weit führen, hier muß auf die ausführliche und vortreffliche Zusammenstellung Zennecks verwiesen werden.

Wege die verschiedenen Bestimmungen der Gravitationskonstante, die sämtlich ihren Berechnungen das Newtonsche Gesetz zugrunde legen, relativ gut übereinstimmende Werte ergeben. Hierbei wurden aber Massen der verschiedensten Größe und verschiedenen Materials in den verschiedensten Entfernungen untersucht: größere Korrektionen am Newtonschen Gesetz sind somit ausgeschlossen.

Soweit also die Erfahrungen reichen, zeigt das Gravitationsgesetz von Newton jedenfalls eine äußerst weitgehende Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse, nichtsdestoweniger sind, speziell auf Grund der oben angeführten kleinen astronomischen Unstimmigkeiten, ganz minimale Korrektionen sehr wohl noch möglich. Abweichungen vom Gravitationsgesetz könnten sich nun ganz allgemein nach zwei Richtungen hin geltend machen: 1. könnten die Kräfte der Gravitation von den beiden Faktoren Masse und Entfernung in etwas anderer Weise abhängen, als es im Newtonschen Gesetz ausgesprochen ist, und 2. könnten dieselben auch noch von Faktoren abhängen, die in jenem Gesetz überhaupt nicht enthalten sind.

Eine scharfe Trennung dieser beiden Fragen läßt sich jedoch nicht immer durchführen, da dieselben bezüglich mancher Punkte übereinandergreifen.

Ia) Abhängigkeit der Gravitation von der Masse. Die Proportionalität der Gravitationskraft mit den Massen ist durch die Gesetze der Himmelsmechanik bis zu einem sehr hohen Grade gewährleistet, und die experimentellen Bestimmungen der mittleren Erddichte führen zu dem gleichen Ergebnis. Vergleicht man z. B. die verschiedenen Resultate der Laboratoriumsversuche miteinander, so ergibt sich folgendes Bild.

Beobachter	Gravitierende Masse	Δ
Boys	7,4 kg	5,5270
Braun	9,1 „	5,52725
Poynting	154 „	5,4934
Wilsing	325 „	5,577
Richarz u. Krigar-Menzel	100 000 „	5,507

In demselben Rahmen bewegen sich auch die Beobachtungswerte für Δ, wie sie nach den verschiedenen terrestrischen Versuchsmethoden erhalten wurden, bei denen als gravitierende Massen z. B. Berge von 3000 bis 4000 m Höhe oder Erdschichten verschiedener Dicke in Wirkung traten.

Die obigen Zahlen beziehen sich allerdings auf Massen verschiedenen Materials. Will man speziell nur Massen desselben Materials miteinander vergleichen, so greift man am besten die Messungen von Poynting und diejenigen von Richarz und Krigar-Menzel heraus, die zudem auch nach derselben Methode ausgeführt wurden. Trotzdem hier die Masse in dem einen Fall rund 650-mal so groß war wie im anderen, stimmen die Resultate bis auf ca. 0,2% überein.

Im Anschluß hieran möge noch kurz auf die Versuche hingewiesen werden, welche man zur experimentellen Prüfung des Newtonschen Gesetzes für Massen verschiedener Zusammensetzung ausgeführt hat. Baily und v. Eötvös arbeiteten mit der Drehwage. Newton und Bessel mit Pendeln aus verschiedenem Material, doch konnten diese Forscher bei ihren ausgedehnten Versuchsreihen nirgends Unterschiede konstatieren, welche die Fehlergrenze überschritten hätten.

Es wäre weiterhin noch die Vermutung möglich, daß die Anziehung zweier Massen von deren Struktur abhängen könnte, zumal da dies durch manche Theorien zur Erklärung der Gravitation nahegelegt wird. Versuche, welche in dieser Hinsicht von Kreichgauer, Mackenzie, Poynting und Grey an Kristallen bezw. kristallisierenden Substanzen angestellt wurden, haben jedoch nicht den mindesten Einfluß der physikalischen Struktur erkennen lassen.

Schließlich hat man noch versucht, ob nicht durch den Prozeß der chemischen Umsetzung direkte Aenderungen in der Gravitation zu beobachten seien. Die darauf bezüglichen Versuche von Kreichgauer, Landolt, Heydweiller und Hänsel haben jedoch nichts derartiges nachweisen können.

Ib) Abhängigkeit der Gravitation von der Entfernung. Auch in dieser Beziehung hat sowohl die astronomische wie die experimentelle Prüfung des Newtonschen Gesetzes zu keinem positiven Ergebnis geführt. Experimentell liegen hier die Verhältnisse zwar recht schwierig; wir besitzen auch nur eine besondere Untersuchung von Mackenzie, welcher mit der Drehwage dieselben gravitierenden Massen in verschiedenem gegenseitigen Abstande untersuchte. Um so mehr bieten die Probleme der Astronomie Gelegenheit, die im Newtonschen Gesetz ausgedrückte Abhängigkeit von der Entfernung einer äußerst peinlichen Prüfung zu unterziehen. Schon Newcomb hat sich mit dieser Frage beschäftigt, und er findet, daß die Mondparallaxe, die Mondstörungen und das dritte Keplersche Gesetz die Entfernungsfunktion bis zu einem sehr hohen Grade innerhalb der Grenzen des Planetensystems verbürgen. Demgegenüber haben allerdings die neueren astronomischen Beobachtungen auf gewisse Unstimmig-

keiten hingewiesen, von denen oben ja schon die Rede war, und obwohl diese Differenzen zwischen Theorie und Beobachtung nur äußerst minimale Beträge erreichen, so ist der Gedanke nicht von der Hand zu weisen, daß die beobachteten Anomalien möglicherweise doch in einer ganz geringen Ungenauigkeit des Newtonschen Gesetzes, und zwar speziell der Entfernungsfunktion, begründet sind. Schon Newton hat darauf hingewiesen, daß eine jede Korrektion an dem Exponenten 2 der Entfernung Perihelbewegungen der Planeten zur Folge haben würde, und Hall hat dann gezeigt, daß sich in der Tat die beobachtete Anomalie in der Perihelbewegung des Merkurs erklären läßt, wenn man für die Entfernungsfunktion $1/r^2$ die schon von Green diskutierte Form $1/r^{2+\lambda}$ annimmt und dabei $\lambda = 16 . 10^{-8}$ setzt. Derselbe Zahlenwert von λ würde auch die beobachtete Perihelbewegung des Mars erklären, dagegen würden sich hierbei für Venus und Erde etwas zu große Perihelbewegungen, für den Mond sogar recht große Abweichungen ergeben.

IIa) Einfluß der Temperatur und des Mediums auf die Gravitation. Wir kommen nunmehr zum zweiten Teil der Prüfung des Newtonschen Gesetzes, insofern als jetzt der Einfluß von Faktoren betrachtet werden soll, die in jenem Gesetz überhaupt nicht enthalten sind. In bezug auf die Abhängigkeit der Gravitation von der Temperatur hat sich bisher nichts Positives feststellen lassen. Dasselbe gilt auch für die Abhängigkeit vom Medium. Austin und Thwing haben mit der Drehwage Versuche angestellt, bei denen sie zwischen die beiden gravitierenden Massen Platten der verschiedensten Substanzen brachten. Die hierbei beobachteten Differenzen liegen jedoch jedenfalls unterhalb 0,002 der ganzen Anziehung. Zu ganz ähnlichen Werten gelangten auch Kleiner und später Erismann, welche in derselben Richtung Messungen ausführten. Andererseits hat Laplace noch die Möglichkeit einer Absorption diskutiert, welche die Gravitation im Zwischenmedium erfahren könne. Er setzte zu diesem Zwecke die Gravitationskraft

$$K = G \frac{m_1 . m_2}{r^2} . e^{-\alpha r} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

Die Anwendung auf das System Sonne — Mond — Erde führte jedoch zu dem Resultat, daß der Absorptionskoeffizient $\alpha < \frac{1}{10^6 R}$ sein müßte, wenn R den Radius der Erde bedeutet.

IIb) Abhängigkeit der Gravitation von der Zeit. In dieser Beziehung könnten zwei Erscheinungen auftreten: 1. eine Aenderung oder Schwankung der Gravitationskraft mit der Zeit, von der jedoch bisher nichts bekannt ist; zweitens aber könnte die Gravitationswirkung Zeit gebrauchen zu ihrer Fortpflanzung. Die Analogie zu den elektrischen, magnetischen und optischen Phänomenen läßt es als durchaus möglich erscheinen, daß auch bei der Gravitation ein solcher Einfluß vorhanden ist. Im übrigen ist man gegenwärtig auch wohl meisthin zu der Ueberzeugung gelangt, daß eine actio in distans bei keiner physikalischen Erscheinung zugegeben werden darf. Hiermit hängt dann gleichzeitig auch noch die andere Frage zusammen, ob das Newtonsche Gesetz nur im Spezialfall für ruhende Körper gültig ist, und ob man eventuell für bewegte Körper ein erweitertes Gesetz an seine Stelle setzen muß.

Die eine Frage nach der endlichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation ist in neuerer Zeit von den Astronomen Lehmann-Filhès, Oppolzer und Hepperch er an den Planetenbewegungen rechnerisch untersucht worden, wobei sie das Newtonsche Gesetz auch für bewegte Körper als richtig annahmen, Es hat sich dabei ergeben, daß unter dieser Bedingung die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation tausend- ja millionenmal so groß wie die Lichtgeschwindigkeit sein müßte, um keine Differenzen mit den Beobachtungen zu erhalten; im übrigen aber würden sich selbst auf diese Weise noch nicht alle beobachteten Unstimmigkeiten beseitigen lassen.

IIc) Erweiterung des Newtonschen Gesetzes für bewegte Körper. Hier liegt zunächst der Gedanke nahe, für die Formulierung des erweiterten Gravitationsgesetzes eines der bestehenden elektrodynamischen Grundgesetze zu verwenden. Entsprechend dem Weberschen Gesetz würde dann das Potential der Gravitation den Ausdruck annehmen:

$$P = G \frac{m_1 . m_2}{r^2} . \left[1 - \frac{1}{c^2} \cdot \left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right] . . \ (19)$$

Setzt man hierin c gleich der Lichtgeschwindigkeit, so ergibt sich jedoch für den Merkur eine säkulare Perihelbewegung von nur 14″. Die Anwendung des Gaußschen Grundgesetzes liefert für die Gravitationskraft K zwischen zwei Massen m_1 und m_2 mit den Koordinaten $x_1y_1z_1$ bezw. $x_2y_2z_2$ den Ausdruck:

$$K = G \frac{m_1 . m_2}{r^2} . \left\{1 + \frac{2}{c^2}\left[\left(\frac{d(x_1-x_2)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d(y_1-y_2)}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d(z_1-z_2)}{dt}\right)^2 - \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right]\right\} (20)$$

Nach der Berechnung von Tisserand ergibt indessen auch diese Formel für die

säkuläre Perihelbewegung des Merkurs einen zu kleinen Wert von nur 28″. Schließlich würde man aus dem Riemannschen Grundgesetz:

$$P = G\frac{m_1 . m_2}{r^2} . \left\{1 - \frac{1}{c^2}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2\right]\right\} . . (21)$$

worin x y z die Koordinaten von m_1 relativ zu m_2 bedeuten, nach der Berechnung von Lévy gerade die doppelte Perihelbewegung des Merkurs erhalten. Lévy hat deshalb eine Kombination der Weberschen und Riemannschen Potentialfunktionen vorgenommen in der Form:

$$P = P_{Weber} + \alpha (P_{Riemann} - P_{Weber}) \quad (22)$$

Die Größe von α berechnete er aus der beobachteten Perihelbewegung des Merkurs, und zwar ergab sich $\alpha = 1{,}64$ bezw. 2,02, je nachdem er für die säkulare Perihelbewegung den Wert von 38″ bezw. 41″,25 einführte, und je nachdem er die durch das Webersche Gesetz gegebene Perihelbewegung = 14″,4 bezw. 13″,65 ansetzte.

Wir sehen also, daß sich auf diese Weise in der Tat für bewegte Körper ein erweitertes Gravitationsgesetz formulieren läßt, welches die größten bisher festgestellten Differenzen zwischen Theorie und Beobachtung beseitigt. Im übrigen aber erscheint diese etwas künstliche Kombination der beiden elektrodynamischen Grundgesetze doch sehr wenig befriedigend.

Neuerdings hat nun Gerber aus dem Zeitverbrauch bei der Wirkung der Gravitation eine Potentialfunktion abgeleitet, welche ebenfalls die anomale Perihelbewegung des Merkurs verschwinden läßt. Er nimmt an, das von einer Masse m nach einer anderen Masse μ ausgesandte Potential sei $\frac{m}{r}$, wenn r den Abstand der beiden Massen im Moment der Aussendung des Potentials bedeutet. Auf diese Weise kommt er dann zu der Formel:

$$P = \frac{m}{r}\left[1 + \frac{2}{c} \cdot \frac{dr}{dt} + \frac{3}{c^2} \cdot \left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right] . \quad (23)$$

Berechnet man hiernach die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der Gravitation aus der beobachteten Perihelbewegung des Merkurs, so ergibt sich c = 305500 km/sek, also fast genau die Lichtgeschwindigkeit. Des weiteren folgen für die anderen Planeten aus der Gerberschen Annahme keine Schwierigkeiten, ausgenommen für Venus, bei der sich eine etwas zu große Perihelbewegung von 8″ ergeben würde.

Zur Vervollständigung der Uebersicht sei schließlich noch auf die Theorien von Laplace und H. A. Lorentz hingewiesen, deren genauere Besprechung hier jedoch zu weit führen würde, zumal da sie kein befriedigendes Resultat ergeben haben. Lorentz hat dabei den Versuch gemacht, seine für bewegte Körper aufgestellten Maxwellschen Gleichungen auch auf die Gravitation zu übertragen (vgl. Abschnitt **18**, II). Er schließt sich hierbei der Zöllnerschen Gravitationstheorie an, welche im letzten Abschnitt noch zur Besprechung kommen wird.

Betrachtet man zum Schluß die ganzen Versuche, welche darauf hinzielen, für bewegte Körper eine Erweiterung des Newtonschen Gesetzes einzuführen, um auf diese Weise die Differenzen zwischen Beobachtung und Theorie zu beseitigen, so sieht man, daß sowohl die Gerbersche wie Lévysche Annahme der Lösung schon sehr nahe kommen. Weiterhin ergibt sich noch das interessante Resultat, daß in diesen beiden Ansätzen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitation gleich derjenigen des Lichtes genommen wird.

IId) Erweiterung des Newtonschen Gesetzes für unendlich große Massen. Schließlich ist noch in einer anderen Richtung die Allgemeingültigkeit des Newtonschen Gesetzes in Zweifel gezogen worden. Nimmt man nämlich an, daß der Weltraum unendlich viele Massen von endlicher Ausdehnung enthalte, so wäre streng genommen die Aufgabe zu lösen, für einen einzigen Punkt die Gravitationswirkung dieser sämtlichen Massen zu bestimmen. In diesem Falle kann jedoch die nach dem Newtonschen Gesetz berechnete Kraftwirkung sowohl einen unendlich großen wie völlig unbestimmten Wert annehmen, wie C. Neumann und Seeliger gezeigt haben. Letzterer hat deshalb vorgeschlagen, zur Beseitigung dieser Bedenken die Entfernungsfunktion etwas zu modifizieren. Schreibt man das Gravitationsgesetz in der schon von Laplace aufgestellten Form

$$K = G . \frac{m_1 . m_2}{r^2} . e^{-\alpha r}, \quad . \ . \ . \ . \ (18)$$

so würde dies bereits dem obigen Zweck genügen. Seeliger berechnet dann α aus der säkularen Perihelbewegung des Merkurs und erhält $\alpha = 38 . 10^{-8}$. Dieser Wert von α würde allerdings für die übrigen Planeten größere Perihelbewegungen zur Folge haben, als sie tatsächlich beobachtet wurden. Neumann hat eine andere Form des Attraktionsgesetzes diskutiert, kommt jedoch bezüglich der Perihelbewegungen der Planeten zu noch größeren Widersprüchen. Die schon von Green und Hall angenommene Modifikation

$$K = G . \frac{m_1 . m_2}{r^{2+\lambda}} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ (24)$$

führt bei unendlich großen Massen zu denselben Schwierigkeiten wie das Newtonsche Gesetz.

Das Bedenken von Seeliger ließe sich eventuell auch noch auf eine gänzlich andere Weise beseitigen. Pearson und später Föppl haben vorgeschlagen, in Analogie zu den elektrischen und magnetischen Fluiden neben den positiven auch negative Massen einzuführen, welche von ersteren abgestoßen würden, und zwar soll hierbei die Gesamtmasse des Universums gleich Null angenommen werden. Die einzige Schwierigkeit einer solchen Annahme besteht wohl darin, daß man nie eine Abstoßung zwischen zwei Massen beobachtet hat, doch könnte man auch annehmen, daß die negativen Massen durch die Abstoßung der positiven in Räume gelangten, welche der Beobachtung nicht mehr zugänglich sind.

18. Erklärungsversuche der Gravitation. Allgemeines: Entsprechend dem auch heute noch üblichen Ausdruck, daß die Massen „sich anziehen“, hat man besonders in früherer Zeit vielfach angenommen, daß die Gravitation eine allgemeine, den Körpern innewohnende Eigenschaft sei, und hat somit auf eine Erklärung der Gravitation durch Zurückführung derselben auf mechanische oder andere Erscheinungen einfach verzichtet. Dieser Standpunkt wäre identisch mit der Annahme einer unvermittelten Fernwirkung. Daß jedoch die meisten der heutigen Physiker einen solchen Standpunkt überhaupt als unzulässig betrachten, ist bereits im vorigen erwähnt worden. Es ist auch bemerkenswert, daß Newton selbst weit davon entfernt war, eine unvermittelte Wirkung in die Ferne zu behaupten; er selbst spricht dies ganz bestimmt aus; welches aber die Ursache der Gravitation sei, vermag er nicht anzugeben.

Nun muß man andererseits allerdings zugeben, daß die drei Eigenschaften, welche allgemein als beweiskräftiges Kriterium gegen eine Fernwirkung und für eine Nahewirkung auftreten (man vergleiche die Erscheinungen des Elektromagnetismus), bei der Gravitation bisher noch nicht mit Sicherheit nachgewiesen werden konnten: es sind dies erstens die endliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Gravitationswirkung, zweitens die Beeinflussung des Mediums durch die Gravitation und drittens die Beeinflussung der Gravitationswirkung durch das Medium.

Im übrigen ließe sich auch noch die Frage diskutieren, ob denn nun wirklich vom erkenntnistheoretischen Standpunkt eine Nahewirkung verständlicher erscheint als eine actio in distans. Es würde hier jedoch zu weit führen, darauf näher einzugehen; wegen Einzelheiten sei auf die Darstellung Auerbachs in Winkelmanns Handbuch der Physik verwiesen.

An Versuchen zur Erklärung der Gravitation hat es nie gefehlt. Zahlreiche Gelehrte sind seit den Tagen Newtons bemüht gewesen, zu einer Lösung dieses Problems beizutragen. Eine einheitliche Klassifikation aller dieser Theorien dürfte wohl kaum durchzuführen sein, doch lassen sich dieselben in gewisse Gruppen zusammenfassen, von denen wir jetzt zunächst diejenigen auf mechanischer und dann die auf elektromagnetischer Grundlage näher betrachten wollen. Es würde auch zu weit führen, hier eine einigermaßen erschöpfende Darstellung aller aufgestellten Hypothesen zu versuchen. Die folgenden Darstellungen müssen sich auf eine Skizzierung der hauptsächlichsten Theorien beschränken und werden von den übrigen nur die eine oder andere noch kurz zitieren (wegen weiterer Einzelheiten sei nochmals auf die ausführliche Abhandlung Zennecks verwiesen).

Ia) Aetherstoßtheorien. Unter den mechanischen Erklärungsversuchen der Gravitation nehmen die Aetherstoßtheorien den ersten Platz ein. Schon Newtons Zeitgenosse Huyghens sowie die Mathematiker Joh. Bernoulli, Euler und der Genfer Lesage haben in dieser Richtung Hypothesen aufgestellt. Der letztere insbesondere arbeitete seine Vorstellungen in sehr übersichtlicher und geschickter Form aus, so daß sie den Ausgangspunkt aller späteren Theorien dieser Art bildeten. Hiernach wird auch dem Aether eine atomistische Struktur zugeschrieben, und zwar sollen nach Lesage die einzelnen Aetherteilchen sämtlich mit derselben außerordentlich hohen Geschwindigkeit regellos nach allen nur möglichen Richtungen durcheinander fliegen. Denkt man sich dann nur ein einzelnes Körperelement in den Aether eingebettet, so wird dasselbe im Mittel allseitig dieselbe Stoßwirkung von seiten der herumschwirrenden Aetherteilchen erfahren und somit keine Verschiebungen anzeigen. Anders liegen die Verhältnisse bei Annahme von zwei Körperteilchen. Hier wird ein jedes derselben für das andere eine „Schirmwirkung“ gegenüber den Stößen der Aetheratome ausüben, und somit wird ein jedes der beiden Körperteilchen auf der dem anderen gegenüberliegenden Seite weniger Stöße erhalten als in sämtlichen anderen Richtungen. Infolgedessen werden die beiden Körperelemente gegeneinander getrieben, und man kann auch zeigen, daß dieser Antrieb umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung beider Körperteilchen sein muß, sobald man die letzteren als groß gegenüber ihrem beiderseitigen Abstande annimmt.

Denkt man sich nun statt des nur einen

Körperteilchens auf der einen Seite deren mehrere, so tritt keine Schwierigkeit auf, solange dieselben alle nebeneinander liegen. In diesem Falle muß ja die Schirmwirkung auf der einen Seite proportional der Anzahl der Teilchen zunehmen. Sobald dagegen diese Körperteilchen hintereinander angenommen werden, bieten sie nicht mehr dieselbe Schirmwirkung wie im ersten Fall. Um diese Schwierigkeit zu beheben, führte Lesage noch die Annahme ein, daß die gravitierenden Massenteilchen für die Aetherteilchen außerordentlich porös seien.

Bei der bisherigen Betrachtung haben wir nun noch einen Punkt vergessen. Beschränken wir uns wieder auf zwei Körperelemente, welche im Aether eingebettet seien. Es wird dann ein jedes derselben auch von einer Anzahl Aetherteilchen getroffen werden, die nur durch die Reflexion am anderen Körperelement ihre Richtung auf das erste einschlagen. Um daher die durch die Schirmwirkung hervorgerufene Gravitation nicht vollständig aufzuheben, muß man annehmen, daß die Aetherteilchen bei der Reflexion einen Teil ihrer Geschwindigkeit einbüßen. Lesage macht deshalb die weitere Voraussetzung, daß die Aetherteilchen vollkommen unelastisch seien. Es würde damit die Geschwindigkeit der reflektierten Teilchen nur $^2/_3$ so groß ausfallen wie diejenige der nichtreflektierten, so daß auf diese Weise doch ein Antrieb der beiden Körperelemente gegeneinander möglich wäre.

Diese Theorie von Lesage ist in neuerer Zeit hauptsächlich von Isenkrahe weiter ausgebaut worden. Er vertritt die Ansicht, welche schon vor ihm von Preston ausgesprochen wurde, daß die Geschwindigkeiten der Aetherteilchen nicht alle gleich groß, sondern analog den Vorstellungen der kinetischen Gastheorie als verschieden anzusehen seien. Preston hatte auch darauf hingewiesen, daß in diesem Falle die mittlere Weglänge der Aetherteilchen von der Größenordnung der Planetenentfernungen angenommen werden müsse. Während aber Isenkrahe bei allen seinen Ueberlegungen stets nur eine mittlere Geschwindigkeit der Aetherteilchen einführt, hat später Rysaneck konsequent die ganzen Anschauungen der kinetischen Gastheorie auf die Theorie von Lesage übertragen und dementsprechend auch für die Geschwindigkeiten der Aetheratome das Maxwellsche Verteilungsgesetz berücksichtigt.

Um ferner eine den Massen proportionale Gravitationswirkung herauszubekommen, was bei der Annahme von Lesage nur für Körper desselben Stoffes gültig ist, nimmt Isenkrahe an, daß „die letzten Bestandteile der Materie alle gleich groß, daß es vielleicht die Aetheratome selber seien". Uebrigens läßt er die Porosität der Körperelemente selber fallen und setzt dafür voraus, daß der Abstand der Atome eines Körpers groß sei gegenüber ihren Dimensionen. Diese Annahme findet sich in vielen neueren Aetherstoßtheorien wieder, doch weist Croll darauf hin, daß dieselbe im Widerspruch stehe zu den Schätzungen Thomsons über die Größe der Körperatome und ihre Anzahl in der Volumeneinheit.

Auch noch in vielen anderen Richtungen hat es an Einwänden gegen diese verschiedenen Stoßtheorien nie gefehlt, da sich bei näherer Betrachtung zahlreiche Schwierigkeiten ergeben. Unbedingte Voraussetzung für das Zustandekommen einer Gravitationswirkung überhaupt ist zunächst die Bedingung, daß die Aetherteilchen bei ihrer Reflexion an den Körperelementen an Geschwindigkeit verlieren. Diese Schwierigkeit wird am einfachsten durch die Annahme des unelastischen Stoßes beseitigt. Doch erhebt sich damit sofort die weitere Frage, wo die beim Stoß verloren gegangene Energie bleiben soll. Leray, Secchi, W. Thomson, Preston, Vashy, Isenkrahe, Rysaneck u. a. haben zwar versucht, eine Lösung dieses Problems zu geben, doch ist dabei keiner von ihnen zu einem einwandfreien Resultate gelangt.

Gleich große Schwierigkeiten erheben sich weiterhin gegen die Annahme einer hohen Porosität der Körper für die Aetherteilchen. Will man die Proportionalität der Anziehung mit der Masse herausbekommen, so müßte man annehmen, daß die Aetherteilchen nach ihrem Anprall auf die äußere, erste Körperschicht nunmehr auch auf die darunter liegende zweite und weiterhin auf alle folgenden Körperschichten stets wieder mit derselben Energie auftreffen. Diese Annahme würde aber zugleich eine Gravitationswirkung überhaupt ausschließen. Setzt man andererseits voraus, daß die Aetheratome beim Passieren einer Körperschicht an Energie einbüßen, so würde eine solche Annahme nicht zu der Proportionalität zwischen Gravitation und Masse führen, worauf Bock besonders hingewiesen hat.

Hiermit sind die Einwände, die man gegen die Aetherstoßtheorien gemacht hat, noch lange nicht erledigt. Es würde indessen zu weit führen, wenn die zahlreichen darauf bezüglichen Erörterungen hier alle zur Besprechung kommen sollten. Nur auf die Theorie von Jarolimek sei noch besonders verwiesen. Er wendet sich auch gegen die Annahme, daß der Aether als ein Gas im Sinne der kinetischen Gastheorie zu betrachten sei und macht darauf aufmerksam, daß für die Gravitationswirkung zweier Körperelemente nur diejenigen Aetheratome in

Betracht kommen können, deren tatsächliche Weglänge größer als der Abstand der beiden Körperteilchen ist, und daß andererseits „in der Ungleichheit der Weglängen der Aethermoleküle die einfachste Erklärung für das Gravitationsgesetz gegeben sei".

Ib) Hydrodynamische Theorien: Pulsationen. Aetherschwingungen. Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Erklärungsversuchen der Gravitation nehmen die hydrodynamischen Theorien den Aether als ein Kontinuum an. Andererseits werden die in dem Aether eingebetteten Körperelemente nicht als ruhend, sondern als bewegt vorausgesetzt, und zwar sollen die ponderablen Elemente Schwingungen ausführen, deren Wirkungen sich von einem zum anderen Teilchen als longitudinale Aetherwellen fortpflanzen und dadurch deren Gravitation veranlassen. Schon Hooke, ein Zeitgenosse Newtons, hat diese Ansicht ausgesprochen, die dann nach ihm von vielen Physikern wieder aufgenommen wurde.

Die erste einigermaßen befriedigende Lösung wurde indessen erst durch die hydrodynamischen Arbeiten von Bjerknes ermöglicht, welcher in seiner mathematisch sehr exakt durchgearbeiteten Lehre der Pulsationen von Kugeln das Auftreten hydrodynamischer Fernkräfte behandelte. Unter den Pulsationen eines kugelförmig gedachten Elementes sind dabei regelmäßige Kontraktionen bezw. Dilatationen desselben verstanden, und zwar derart, daß der Radius eines solchen Teilchens in Funktion der Zeit folgenden Ausdruck besitzt:

$$r = r_0 + a \, . \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

wo a die Amplitude und T die Periode der Pulsationen bedeutet.

Bjerknes hat nun nachgewiesen, daß zwei pulsierende Kugeln, welche in einer inkompressiblen Flüssigkeit eingebettet sind, stets eine scheinbare Anziehung zeigen, wenn ihre Radien klein gegenüber ihrem beiderseitigen Abstande sind. Ferner ist die Anziehung proportional der Intensität der Pulsationen und umgekehrt proportional dem Quadrate der Entfernung beider Kugeln, wenn deren Pulsationen dieselbe Schwingungszahl und Phase besitzen, also synchron verlaufen.

Hierzu ist später von Leahy noch eine sehr wertvolle Erweiterung gegeben worden: Bjerknes hat bei seiner Theorie das Zwischenmedium als vollkommen inkompressibel angenommen. Wenn sich dagegen zwei synchron pulsierende Kugeln in einer kompressiblen Flüssigkeit befinden, so werden dieselben statt der scheinbaren Anziehung eine gegenseitige Abstoßung erfahren, sobald ihr Abstand größer als eine halbe Wellenlänge ist.

Diese hydrodynamischen Theorien sind nun zur Erklärung des Newtonschen Gesetzes herangezogen worden. Soll die Gravitation auf Pulsationen der Körperelemente zurückgeführt werden, so müssen also nach dem Obigen die Intensitäten der Pulsationen der Masse proportional gesetzt werden. Ferner weist Korn, der sich ganz besonders um den modernen Ausbau der hydrodynamischen Gravitationstheorien bemüht hat, in Anknüpfung an die Erörterungen Leahys darauf hin, daß man den Aether entweder als vollkommen inkompressibel (Bjerknes) oder jedenfalls als so wenig kompressibel annehmen muß, daß die halbe Wellenlänge der longitudinalen Aetherschwingungen größer sei als diejenigen Entfernungen, innerhalb deren die Gültigkeit des Newtonschen Gesetzes durch die Beobachtung garantiert ist. Im übrigen lassen sich gegen diese Pulsationstheorien noch viele Einwände erheben, die nach den verschiedensten Richtungen hin auch schon zu Abänderungen geführt haben.

Ic) Druckdifferenzen im Aether. Aetherströmungen. Eine weitere Gruppe von Erklärungsversuchen beruht auf der schon von Newton ausgesprochenen Annahme, daß es sich bei der Gravitation einfach um Strömungen im Aether handle, die durch irgendwelche Druckdifferenzen hervorgerufen seien. Auch hierüber liegen zahlreiche Arbeiten vor, die jedoch im allgemeinen sehr wenig befriedigen.

II. Elektrostatische bezw. -magnetische Gravitationstheorien. Schon Mossotti (1836) hat versucht, die Erscheinungen der Gravitation auf die Wirkung elektrostatischer Kräfte zurückzuführen. Er nimmt an, daß zwei Körpermoleküle und auch zwei „Aetheratome" sich gegenseitig abstoßen, daß dagegen zwischen einem Körpermolekül und einem Aetheratom eine Anziehung stattfindet, und zwar soll die letztere überwiegen. Auf diese Weise kommt für zwei im Aether eingebettete Körpermoleküle eine gegenseitige Anziehung zustande, wie sie das Newtonsche Gesetz verlangt.

Zöllner hat später diese Vorstellungen noch vereinfacht. Er denkt sich ein jedes Massenelement aus einem positiv und einem negativ geladenen Teilchen bestehend und setzt weiterhin voraus, daß die Anziehung zwischen den ungleichnamigen Elektrizitätsmengen etwas größer als die Abstoßung zwischen den gleichnamigen ist; die Differenz dieser beiden Kräfte wird als Gravitationskraft gedeutet.

Diese Erklärung hat jedoch zur Folge, daß auch die Gravitation sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten muß. Dement-

sprechend hat zunächst Weber die Zöllnerschen Ideen unter Benutzung seines elektrodynamischen Grundgesetzes einer mathematischen Behandlung unterworfen. Ferner hat H. A. Lorentz, wie schon im vorigen berichtet wurde, den Versuch gemacht, seine auf bewegte Körper ausgedehnten Maxwellschen Gleichungen auf die Gravitation zu übertragen, indem er die Feldgleichungen der Elektronentheorie ungeändert läßt, aber die Gleichungen für die ponderomotorischen Kräfte im Sinne der Zöllnerschen Ideen modifiziert. Er nimmt dabei speziell an, daß die Anziehung ungleichartiger Elektrizitäten im Verhältnis β/α größer sei als die Abstoßung gleichartiger, wo α willkürlich $= 1$ gesetzt werden kann und $2\,(\beta-\alpha)$ die Gravitationskonstante G ist. Diese Theorie hat dann Lorentz auch auf die Bewegung des Merkur angewandt, und zwar unter der Voraussetzung, daß die Sonne eine konstante Geschwindigkeit im Aether besitze, und daß der letztere relativ zu den Fixsternen ruhe; indessen findet er auf diese Weise keine Erklärung für die beobachteten Anomalien, da sich für den Merkur eine säkulare Perihelbewegung von nur 1″,3 ergeben würde.

Zu demselben Resultat wie diese Lorentzsche Theorie führt übrigens auch die elektrische Gravitationstheorie von J. J. Thomson. Er betrachtet die von positiven und negativen Elektrizitätsmengen hervorgerufenen Feldstärken gesondert und nimmt an, daß die Maxwellschen Spannungen, die den Quadraten der Feldstärken proportional sind, etwas verschiedene Proportionalitätsfaktoren haben, je nachdem der Anteil der Spannungen von den positiven oder von den negativen Feldern oder von dem Zusammenwirken beider herrührt.

Bei der allgemeinen Durchführung der elektromagnetischen Gravitationstheorien erhebt sich nun noch die weitere Frage, wie sich die elektromagnetischen und die Gravitationswirkungen superponieren, und wie es möglich ist, daß ein Leiter für elektrostatische Kräfte eine Schirmwirkung zeigt, dagegen keine für die Gravitationskräfte. Diese Frage hat Gans dadurch gelöst, daß er die Grundgleichungen der Elektronentheorie für die positiven und negativen Elektronen gesondert betrachtet und im Ausdruck für die ponderomotorischen Kräfte entsprechend den Anschauungen Zöllners zwei verschiedene Konstanten einführt; im letzteren Punkte schließt er sich also den Rechnungen von Lorentz an. Durch eigene Annahmen hat dann Gans diese Gleichungen derart transformieren können, daß wir für die beobachteten Erscheinungen die gewöhnlichen Gleichungen der Elektronentheorie und außerdem auch die Gravitation erhalten, wenn wir die Gravitationskonstante gleich $\frac{\beta^2-\alpha^2}{\alpha}$ setzen und die positiven Elektronen mit den gravitierenden Massen identifizieren. Hierzu ist aber noch besonders zu bemerken, daß jetzt ein ungeladener Körper, d. h. ein solcher, an dem man von ponderomotorischen Kräften nur die Gravitation beobachtet, etwas mehr negative als positive Elektrizität enthält. Durch diese Theorie erscheinen dann die obigen Fragen beantwortet.

Schließlich hat W. Wien noch darauf aufmerksam gemacht, daß ja auch die träge Masse der einzelnen Elektronen, aus denen die Materie aufgebaut ist, von der Geschwindigkeit abhänge, und daß somit die Masse der Himmelskörper nicht als konstant angenommen werden dürfe. In dieser Richtung sind dann die darauf bezüglichen Rechnungen von Wilkens und später von Wacker noch erweitert worden. Ersterer legt das Schwarzschildsche kinetische Potential zugrunde und schließt sich im übrigen der unmodifizierten Newtonschen Gravitationskraft an. Er erhält aber auf diese Weise für die säkulare Perihelbewegung des Merkur einen Wert von nur 4″,3. Wacker dagegen baut auf den Rechnungen von Lorentz weiter auf und gelangt dabei in Anwendung auf die Bewegung des Merkur zu folgendem Ergebnis: 1. Unter der Annahme, daß die Sonne im Aether ruht, und daß die Elektronen der Materie starr (Abraham) oder deformierbar (Lorentz) sind, ergibt sich eine säkulare Perihelbewegung von 5″,8 bezw. 7″,2; 2. Für den Fall, daß der Aether relativ zum Fixsternsystem ruht, daß die Elektronen der Materie starr sind und die absolute Geschwindigkeit der Sonne $2{,}10^6$ cm/sec beträgt, findet er, je nach den Annahmen über die Größe des Sonnenapex, eine säkulare Perihelbewegung von 6″,8 bezw. 5″,3. Diese Zahlen stimmen nun zwar mit der beobachteten Perihelverschiebung von rund 40″ durchaus noch nicht überein, doch glaubte Wacker zunächst, dies sei möglicherweise nur darin begründet, daß man die Geschwindigkeit des Sonnensystems gegenüber dem Aether nicht genau kenne.

Da jedoch der Michelson-Morleysche und der Trouton-Nobelsche Versuch dafür sprechen, daß schon die Glieder zweiter Ordnung der ursprünglichen Lorentzschen Theorie unrichtig sind, so erklärte später Wacker selbst eine weitere Verfolgung seiner obigen Rechnungen für zwecklos und versucht schließlich noch eine Modifikation der vorigen Betrachtungen auf dem Boden des von Lorentz und Einstein eingeführten Relativitätsprinzips. Die numerische Be-

rechnung für den Merkur ergibt dabei eine säkulare Perihelbewegung von 7″,2. Dieses Resultat stimmt mit dem einen von ihm zuerst erhaltenen überein, wie es ja auch sein muß, da der Lorentzsche Fall der deformierbaren Elektronen mit dem von ihm formulierten Relativitätsprinzip identisch ist. Auch die Lorentzsche Theorie vermag also die beobachteten Anomalien nicht zu erklären.

Es sei zum Schluß noch auf eine neuere Arbeit von Abraham verwiesen, welcher, vom Standpunkte Minkowskis ausgehend, die Theorie der Schwerkraft nach dem Prinzip der Relativität behandelt. Er kommt dabei u. a. zu der Folgerung, daß die Schwerkraftwellen longitudinal seien. Eine Prüfung seiner Theorie durch Vergleichung mit den astronomischen Beobachtungen hat Abraham nicht gegeben.

Wir können somit die ganzen Betrachtungen des letzten Kapitels dahin zusammenfassen, daß alle Versuche, die Erscheinungen der Gravitation auf mechanischer oder elektromagnetischer Grundlage zu erklären, einstweilen noch zu keinem sicheren Ergebnis geführt haben.

Literatur. *Hand- und Lehrbücher:* **A. Winkelmann,** *Handbuch der Physik, Bd.* 1, *2. Aufl. Leipzig 1908. — Lehrbücher der Physik von* **O. Chwolson** *(Bd.* 1, *Braunschweig 1902),* **Müller-Pouillet** *(Bd.* 1, *10. Aufl. Braunschweig 1906),* **E. Riecke** *(Bd.* 1, *5. Aufl. Leipzig 1912),* **L. Dressel** *(Bd.* 1, *4. Aufl. Freiburg i. Br. 1913). —* **E. Kayser,** *Lehrbuch der allgemeinen Geologie, 4. Aufl. Stuttgart 1912. —* **F. R. Helmert,** *Theorien der höheren Geodäsie, 2 Bde. Leipzig 1884. —* **S. Günther,** *Lehrbuch der Geophysik, Bd.* 1, *Stuttgart 1897.*

Zusammenfassende Darstellungen aus dem Gebiete der Gravitation: **J. Zenneck,** *Gravitation. Encyklopädie der Math. Wiss., Bd.* 5, *Heft 1, S. 25. Leipzig 1903. —* **P. Drude,** *Ueber Fernewirkungen. Wiedemanns Annalen der Physik, Bd.* 62 *(Anhang) 1897. —* **C. Isenkrahe,** *Progr. Gymn. Krefeld 1877/78; Das Rätsel von der Schwerkraft. Braunschweig 1879. —* **A. Korn,** *Eine Theorie der Gravitation und der elektrischen Erscheinungen auf Grundlage der Hydrodynamik, 2. Aufl. Berlin 1898. —* **F. R. Helmert,** *Die Schwerkraft und die Massenverteilung der Erde. Enzyklopädie der Math. Wiss., Bd.* 6, *1 B, Heft 2. Leipzig 1910. —* **J. B. Messerschmitt,** *Die Schwerebestimmung an der Erdoberfläche. Sammlung: Die Wissenschaft, Heft* 27. *Braunschweig 1908.*

Landolt - Börnstein, *Physikalisch - Chemische Tabellen, 4. Aufl. Berlin 1912. —* **Abraham und Sacerdote,** *Recueil de constantes physiques (herausgegeben von der Société française de physique). Paris 1913.*

Wegen der Zitate der einzelnen Originalabhandlungen sei auf die im vorigen angeführten Zusammenfassungen und Lehrbücher verwiesen, in denen die ganze einschlägige Literatur zu finden ist. Es seien hier nur noch einige wenige Arbeiten der letzten Jahre genannt, die in den obigen Darstellungen noch nicht enthalten sind: **M. Abraham,** *Zur Theorie der Gravitation. Physik. Ztschr., Bd.* 13, *S. 1, 1912; Das Elementargesetz der Gravitation. Physik. Ztschr., Bd.* 13, *S. 4, 1912. —* **Th. Erismann,** *Abhängigkeit der Gravitationskraft vom Zwischenmedium. Vierteljahrsschrift d. Naturf. Ges. Zürich, Bd.* 53, *S. 157, 1908. —* **R. Gans,** *Gravitation und Elektromagnetismus. Physik. Ztschr., Bd.* 6, *S. 803, 1905. —* **A. Kleiner,** *La gravitation considerée comme une force se faisant sentir de proche en proche. Arch. sc. phys. et nat., Bd. (4)* 20, *p. 420, 1905. —* **E. Take,** *Ueber etwaige Korrektionen an den von Richarz und Krigar-Menzel ausgeführten Gravitationsbestimmungen. Annalen der Physik, Bd. (4)* 15, *S. 1010, 1904. —* **J. J. Thomson,** *Die elektrische Gravitationstheorie. Cambridge Proc., Bd.* 15, *S. 65, 1909. —* **Wacker,** *Ueber Gravitation und Elektromagnetismus. Physik. Ztschr., Bd.* 7, *S. 300, 1906; Inaug.-Diss. Tübingen 1909. —* **W. Wien,** *Ueber die Möglichkeit einer elektromagnetischen Begründung der Mechanik. Annalen der Physik, Bd. (4)* 5, *S. 501, 1900.*

E. Take.

Schwerspat- und Witheritgruppe.

1. Ueberblick. 2. Schwerspatgruppe. a) Cölestin. b) Schwerspat. c) Bleivitriol. 3. Witheritgruppe. a) Aragonit. b) Strontianit. c) Witherit. 4. Weißbleierz.

1. Ueberblick. Unter dem Namen Schwerspatgruppe faßt man die rhombisch-holoedrisch kristallisierenden Sulfate des Sr, Ba und Pb zusammen. Die beiden ersten, d. h. Cölestin und Schwerspat oder Baryt sind eutropisch und mit dem Bleivitriol oder Anglesit isomorph. Untereinander sind die genannten Sulfate in beschränktem Maße mischbar.

Das entsprechende Ca-Sulfat, der Anhydrit, hingegen ist mit Baryt und Cölestin sicher nicht eutropisch und gilt im allgemeinen als nicht isomorph mit den übrigen Gliedern dieser Gruppe. Den Anlaß hierzu gibt die Verschiedenheit in bezug auf physikalisches Verhalten und Formentwickelung, die z. B. aus den in der untenstehenden Tabelle angegebenen Achsenverhältnissen hervorgeht. Die häufig beobachtete Anwesen-

heit von Ca in den anderen Mineralien dieser Gruppe dürfte demnach nicht als isomorphe Beimischung in der Form des Anhydrits aufgefaßt werden, und man müßte zur Erklärung einen Dimorphismus des $CaSO_4$ annehmen. Aus diesen Gründen wird der Anhydrit im folgenden auch nicht mit besprochen werden, zumal da er in diesem Handwörterbuch an anderer Stelle mit aufgeführt wird (siehe „Calcium“ im Artikel „Berylliumgruppe“).

Schwerspatgruppe, rhombisch-holoedrisch.

Achsenverhältnisse nach Groth

			a	:	b	:	c
Anhydrit	$CaSO_4$		0,8932	:	1	:	1,0008
Cölestin	$SrSO_4$	eutropisch (mit $BaSO_4$); isomorph	0,7809	:	1	:	1,2832
Schwerspat (Baryt)	$BaSO_4$	eutropisch (mit $SrSO_4$); isomorph	0,8152	:	1	:	1,3136
Bleivitriol (Anglesit)	$PbSO_4$	isomorph	0,7852	:	1	:	1,2894

Mit den Sulfatmineralien des Ca, Sr, Ba und Pb stehen die unter dem Namen Witheritgruppe zusammengefaßten und untereinander eutropischen bezw. isomorphen Karbonate derselben Metalle hinsichtlich ihres Vorkommens und ihrer Verwendung in mannigfacher Beziehung. Sie sollen daher im folgenden kurz mit besprochen werden.

Witheritgruppe, rhombisch-holoedrisch.

Achsenverhältnisse nach Groth

			a	:	b	:	c
Aragonit	$CaCO_3$	eutropisch; isomorph	0,6228	:	1	:	0,7204
Strontianit	$SrCO_3$	eutropisch; isomorph	0,6089	:	1	:	0,7237
Witherit	$BaCO_3$	eutropisch; isomorph	0,5949	:	1	:	0,7413
Weißbleierz (Cerussit)	$PbCO_3$	isomorph	0,6101	:	1	:	0,7229

2. **Schwerspatgruppe.** 2a) Cölestin. Spezifisches Gewicht 3,9 bis 4,0. Härte 3 bis $3^1/_2$. Zusammensetzung: 56,39 SrO, 43,61 SO_3, jedoch gewöhnlich etwas Ca oder Ba enthaltend. Der Name leitet sich her von coelestis himmelblau, mit Bezug auf die Farbe einiger Varietäten. — Schöne oft sehr flächenreiche Kristalle von Cölestin sind nicht selten; ihre häufigste besonders von Girgenti bekannte Ausbildungsform veranschaulicht Figur 1 (c Basis, q Brachy-

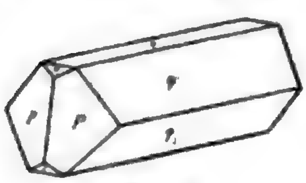


Fig. 1.



Fig. 2.

doma, r Makrodoma, p Prisma). Seltener ist tafelige Ausbildung nach der Basis. Die Spaltbarkeit ist sehr vollkommen nach der Basis, vollkommen nach dem Prisma. Außer Kristallen kommen körnig-dichte Aggregate und parallelfaserige Platten vor. Neben blauen, bläulichen und blaugrauen Varietäten findet er sich meist farblos, weiß oder gelblich.

Der meiste Cölestin tritt auf kleinen Gängen und als konkretionäre Ausscheidung in Kalken, Dolomiten und Mergeln auf. Bekannt sind die Vorkommen von farblosen Kristallen bei Girgenti (mit Schwefel, Gips und Calcit in tertiären Mergeln) und von Jena und Dornburg a. S. in blauen faserigen Platten als Pseudomorphose nach Fasergips (in Kalken und Mergeln des untersten Muschelkalkes). Selten ist Cölestin auf Erzgängen und Mandelräumen vulkanischer Gesteine. Er wird in der Feuerwerkerei und vereinzelt zur Darstellung von Sr-Verbindungen verwendet.

2b) Schwerspat, Baryt. Spezifisches Gewicht 4,3 bis 4,7. Härte 3 bis $3^1/_2$. Zusammensetzung: 65,68 BaO, 34,32 SO_3; häufig ist auch größerer Sr-Gehalt bis zum Barytocölestin ($BaSO_4$: $SrSO_4$ nahezu wie 3:4), auch isomorphe Beimischung von $CaSO_4$ kommt vor im Kalkbaryt. Der Name Schwerspat ist mit Rücksicht auf die gute Spaltbarkeit und das hohe spezifische Gewicht gewählt; auch Baryt leitet sich her von βαρύς schwer. — Von Schwerspat sind sehr schöne und flächenreiche Kristalle mit ca. 120 verschiedenen Formen bekannt. Ziemlich häufig ist die tafelige Ausbildung wie in Figur 2 (c Basis, p Prisma, q Brachydoma)

oder nach der Längsachse prismatische Ausbildung wie in Figur 3 (q Brachydoma, r Makrodoma). Auch nach der Querachse gestreckte, seltener nach der Vertikalachse säulenförmige Kristalle kommen vor. Die Spaltbarkeit ist wie beim Cölestin. Die divergent-blättrigen, fächer- und hahnenkammartigen Aggregate haben faserig-strahlige oder körnig-dichte Struktur. Die vorkommenden Farben sind weiß, fleischrot, gelblich, braun, seltener bläulich.

Schwerspat ist in selbständigen Gängen weit verbreitet. Außerdem findet er sich als Begleiter von Erzen auf Gängen im Harz, Erzgebirge, Thüringer Wald, ebenfalls häufig mit Flußspat z. B. in der Oberpfalz. Seltener ist Schwerspat auf geschichteten Lagerstätten; auch hier kommt er entweder selbständig oder als Bestandteil von geschichteten Erzlagern, wie am Rammelsberg bei Goslar, oder auch als Bindemittel im Sandstein vor. In manchen Mergeln findet er sich als konkretionäre Ausscheidung mit radialer Struktur (z. B. der „Bologneser Spat"). Außer zur Darstellung von Baryumsalzen und weißer Farbe findet der Schwerspat in der Feuerwerkerei, ferner zur Verfälschung von Bleiweiß usw., zum Beschweren von Leinwand, Papier und dergleichen vielfach Anwendung.

2c) Bleivitriol, Anglesit. Spezifisches Gewicht 6,12 bis 6,35. Härte 3. Zusammensetzung: 73,6 PbO, 26,4 SO_3, meist rein. Das Mineral ist nach dem Vorkommen bei Anglesea in England benannt. — Im Habitus sind die zum Teil gut ausgebildeten flächenreichen Kristalle denen des Schwerspates analog. Die Formen sind tafelig, prismatisch oder pyramidal, die ziemlich vollkommene Spaltbarkeit ist wie beim Cölestin. Außer den farblosen Kristallen sind weiße, graue oder braune derbe Massen bekannt.

Als ziemlich häufiges Verwitterungsprodukt des Bleiglanzes (PbS) findet sich das Mineral am Ausgehenden von Bleiglanzlagerstätten, besonders in kleinen eingefressenen Höhlungen (z. B. in schönen Kristallen bei Anglesea in Wales). Bei reichlichem Vorkommen wie in Australien und Mexiko wird es als Bleierz verwendet.

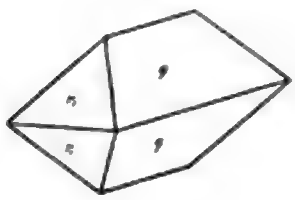


Fig. 3.



Fig. 4.

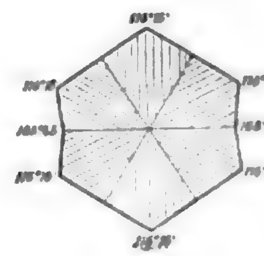


Fig. 5.

3. Witheritgruppe. 3a) Aragonit. Spezifisches Gewicht 2,9 bis 3. Härte $3^1/_2$ bis 4. Zusammensetzung: 56 CaO, 44 CO_2, meist Sr, auch Fe, Mn und Zn enthaltend. Isomorphe Mischungen mit $PbCO_3$ führen den Namen Tarnowitzit. G. A. Werner hat dem Mineral nach seinem Vorkommen in Aragonien den Namen gegeben. — Die häufig strahligen oder nadeligen Kristalle sind gewöhnlich nach der Vertikalachse gestreckt mit domatischer Endigung wie in Figur 4 (b seitliche Endfläche, m Prisma, q Brachydoma) oder mit spitzpyramidal-spießiger Begrenzung. Häufiger als einfache Kristalle sind meist wiederholte Zwillinge nach dem Prisma m, ausgebildet entweder als Lamellen oder als Wendezwillinge. Nach demselben Gesetz findet man auch mimetisch hexagonale Durchkreuzungsdrillinge (vgl. Fig. 5). Aragonit kommt auch in strahligen und stengelig-faserigen Aggregaten, ferner als Sinterüberzug (Sprudelstein) und als kugeliger Erbsenstein (Pisolith) vor. Man beobachtet ihn farblos, weiß, gelb und rötlich, auch grün, bläulichgrau bis schwarz.

Beim Erwärmen über 400° C oder durch Lösung geht Aragonit in die stabile Modifikation des $CaCO_3$, den Calcit, über. Er bildet sich im Gegensatz zu diesem gern aus heißen Lösungen (Sprudel- und Erbsenstein von Karlsbad). Sonst findet er sich seltener auf Klüften und Hohlräumen in jüngeren Eruptivgesteinen, zuweilen auf Erzlagerstätten oder eingewachsen in Ton mit Gips. Weit verbreitet ist Aragonit als Kalkgerüst von Korallen und in den Schalen und der Perlmuttersubstanz von Muscheln. Einzelne Varietäten finden Anwendung als Ornamentsteine.

3b) Strontianit. Spezifisches Gewicht 3,6 bis 3,8. Härte $3^1/_2$. Zusammensetzung: 70,3 SrO, 29,7 CO_2, stets mit etwas $CaCO_3$; mehr $CaCO_3$ enthält der Calciostrontianit (Emmonit). Der Name ist von dem Vorkommen bei Strontian in Schottland her-

geleitet. — Nadelig-spießige Kristalle, Zwillinge nach dem Prisma, faserig-strahlige Aggregate und Farben sind denen des Aragonits analog.

Strontianit kommt auf Erzgängen und zwar besonders auf Schwerspat als jüngere Bildung vor, auch in selbständigen Gängen in Kreidemergeln von Hamm in Westfalen. Außer dem Gebrauch in der Feuerwerkerei und zur Darstellung von Sr-Verbindungen fand aus Strontianit dargestelltes Strontiumoxyd bei dem sogenannten Strontianitverfahren in den Zuckerfabriken zum Entzuckern der Melasse früher häufig Verwendung.

3c) Witherit. Spezifisches Gewicht 4,2 bis 4,3. Härte $3^1/_2$. Zusammensetzung: 77,68 BaO, 22,32 CO_2. Isomorphe Mischungen von $BaCO_3$ und $CaCO_3$ heißen Alstonit. Das Mineral ist nach seinem Entdecker Withering genannt worden. — Das Mineral kommt am häufigsten in hexagonal-mimetischen Drillingsverwachsungen nach dem Prisma vor, aber auch in traubigen radialfaserigen Aggregaten. Farblos, weiß, grau- und gelblichweiß sind die herrschenden Farben.

Witherit findet sich besonders auf Bleiglanzlagerstätten im nordwestlichen England, sonst selten. Er ist giftig und wird daher nur, außer zur Darstellung von Baryumverbindungen, in England als Rattengift verwendet.

3d) Weißbleierz, Cerussit. Spezifisches Gewicht 6,4 bis 6,6. Härte 3 bis $3^1/_2$. Zusammensetzung: 83,5 PbO, 16,5 CO_2. Zinkhaltiger Cerussit heißt Iglesiasit. Der Name leitet sich her von „cerussa" Bleiweiß. Cerussit kommt häufig in farblosen Kristallen von pyramidalen, auch tafeligen und prismatischen Formen vor. Charakteristisch sind auch für ihn wieder hexagonal-mimetische Drillinge nach dem Prisma. Man findet ihn auch in faserigen bis dichten oder erdigen (Bleierde) farblosen, grauen oder schwärzlichen Aggregaten.

Als stellenweise wichtiges Bleierz kommt Cerussit häufiger noch als Bleivitriol im Ausgehenden von Bleiglanzlagerstätten und besonders auch im sogenannten „eisernen Hut" von Gängen vor. Auch als Bindemittel im Sandstein ist er gefunden worden.

Literatur. *Die oben wiedergegebenen Figuren sind dem Grundriß der Kristallographie (2. Auflage) von* **G. Linck** *entnommen. Im übrigen vergleiche man in diesem Handwörterbuch die Artikel: „Gesteinsbildende Mineralien", „Mineralogie" und „Salzlagerstätten".*

K. Spangenberg.

Schwingende Bewegungen.

I. Sinusförmige oder harmonische Schwingungsbewegung. 1. Allgemeines: a) Bedeutung. b) Beziehung zur Kreisbewegung. c) Konstruktion von Sinuskurven. 2. Bestimmungsstücke: a) Amplitude. b) Frequenz und Periode. c) Phase. 3. Kinematik: a) Geschwindigkeit. b) Beschleunigung. 4. Mechanik. a) Quasielastische Kraft. b) Eigenschwingung. c) Energie. 5. Dämpfung: a) Ursache. b) Reibungslose Dämpfung, Dekrement. c) Reibungsdämpfung. 6. Elektrische Schwingungen: a) Wechselströme. b) Eigenschwingungen. c) Analogie elektrischer und mechanischer Schwingungen. II. Zerlegung und Zusammensetzung von Schwingungsbewegungen. 1. Zerlegung nicht sinusförmiger in sinusförmige Schwingungen. 2. Zusammensetzung sinusförmiger Schwingungen: a) Gleiche Frequenzen. b) Ungleiche Frequenzen. c) Ungleiche Richtungen.

I. Sinusförmige Schwingungsbewegung.

1. Allgemeines. 1a) Bedeutung. Schwingende Bewegungen treten in der Natur sehr zahlreich auf und spielen in Physik und Technik eine wichtige Rolle. Alle periodischen Bewegungen, z. B. auch die Rotation, lassen sich auf schwingende Bewegungen zurückführen; die elektrischen Wechselströme und die übrigen elektromagnetischen Schwingungen werden durch die Gesetze der schwingenden Bewegung beherrscht; und schließlich sind alle Wellenbewegungen sowohl beim Wasser wie beim Schall und in der Optik nichts anderes als eine Fortpflanzung schwingender Bewegung. Man hat daher wie überall in der Wissenschaft so auch hier versucht, sich ein einfaches, anschauliches Modell zu machen, an dem man die verschiedenen dabei auftretenden Fragen studieren kann. Und man ist hier in der selten glücklichen Lage, daß sich fast alle Schwingungserscheinungen durch ein einfaches Bild, nämlich das der sogenannten sinusförmigen oder harmonischen Schwingungsbewegung, genügend genau darstellen lassen, und daß gerade die wichtigsten Schwingungserscheinungen sehr genau diesem Bilde entsprechen. Die meisten Resonatoren sondern z. B. durch Resonanz rein sinusförmige Schwingungen aus; beim Schall sind die einfachen reinen Töne Sinusschwingungen, beim Licht die einfarbigen Strahlen, wie man sie bei der Zerlegung durch ein Prisma erhält. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich darin, daß die Aufnahme des Schalls durchs Ohr und des Lichtes durchs Auge auf einer Art Resonanzwirkung beruht. Schließlich lassen sich die allzu weit von der Sinusform abweichenden periodischen Bewegungen nach dem Fourierschen Theorem (s. den Artikel „Fouriersches Theorem"), selbst wenn sie noch so kompliziert sind, auf eine Kombination

sinusförmiger Bewegungen zurückführen. Es ist daher der Mühe wert, sich mit diesem einfachen Bewegungsvorgang etwas eingehender vertraut zu machen.

1b) Beziehung zur Kreisbewegung. Die sinusförmige Bewegung, auch wohl harmonische Schwingungsbewegung genannt, steht in naher Beziehung zu der allereinfachsten periodischen Bewegung, der Kreisbewegung von gleichmäßiger Geschwindigkeit. Bei letzterer bleibt der Abstand $OP = A$ (Fig. 1) des Punktes P von einem Zentralpunkte O aus dauernd derselbe, während der Winkel α mit der Zeit dauernd zunimmt. In Formeln: $A =$ const., $\alpha = \omega t + \varphi$, wenn ω die Winkelgeschwindigkeit, d. h. die Zunahme des Winkels α pro Zeiteinheit bedeutet und φ der Winkel α zu Beginn der Zeitrech-

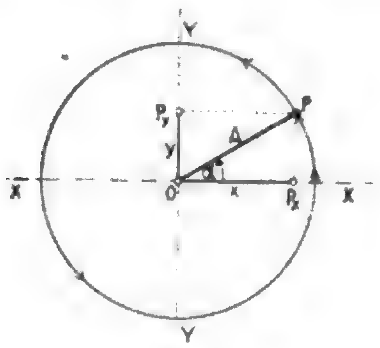


Fig. 1.

nung für $t = 0$ ist. Projiziert man nun den Punkt P rechtwinklig auf zwei zueinander senkrechte, mit X—X und Y—Y bezeichnete Achsen, so gilt bekanntlich die Beziehung: $OP_x = x = A \cos \alpha$, $OP_y = y = A \sin \alpha$. Die Funktionszeichen cos und sin, die auch bei Dreiecksberechnungen vorkommen, bedeuten eine ganz bestimmte Abhängigkeit der Größen x und y vom Winkel α, die entsprechend den in Fig. 1 enthaltenen geometrischen Beziehungen für den Radius $A = 1$ ein für allemal ausgerechnet und in den sogenannten trigonometrischen Tabellen zusammengestellt sind. Jedem Zahlenwerte von α entspricht also ein ganz bestimmter Zahlenwert von x und von y. Läuft nun der Punkt P gleichförmig im Kreise herum, so wird jede seiner Projektionen P_x und P_y dauernd zwischen den Werten $+A$ und $-A$ hin und her pendeln, nach einem Gesetze, das durch die Bedingungen $x = A \cos \alpha = A \cos(\omega t + \varphi)$, resp. $y = A \sin \alpha = A \sin(\omega t + \varphi)$ gegeben ist. Diese charakteristische Art des Hin- und Herpendelns der Punkte P_x und P_y bezeichnet man als eine sinusförmige oder harmonische schwingende Bewegung.

Daß P_x auch sinusförmig schwingt ergibt sich aus der Beziehung $\cos \alpha = \sin(\alpha + 90^0)$.

Während man in der Trigonometrie mit dem Begriffe des Winkels eine bestimmte Stellung seiner Schenkel zueinander, z. B. mit $\alpha = 90^0$ das Senkrechtstehen verbindet, tritt diese geometrische Anschauung bei den hier besprochenen Gesetzen stark zurück. Der Winkel α soll hier vielmehr ein Maß für den vom Punkte P zurückgelegten Weg sein, den man durch $A\alpha$ ausdrücken kann, wenn man unter α die zu dem Zentriwinkel α gehörige Bogenlänge eines Kreises vom Radius 1 versteht. Der Winkel α wird dann nicht mehr in Graden, sondern durch eine beliebige Zahl, das Verhältnis von Bogenlänge zu Kreisradius ausgedrückt. Es bedeutet dann ein und dasselbe, ob man sagt

$\alpha = 6{,}28\ldots = 2\pi$ oder $\alpha = 360^0$
$\alpha = 3{,}14\ldots = \pi$ „ $\alpha = 180^0$
$\alpha = 1{,}57\ldots = \pi/2$ „ $\alpha = 90^0$
$\alpha = 1{,}00$ „ $\alpha = 57{,}3..^0$

allgemein

$\alpha = Z$ „ $\alpha = 57{,}3 \times Z^0$
$\alpha = G/57{,}3 = G\pi/180$ oder $\alpha = G^0$.

Bei der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 1$ würde der Punkt P auf dem Kreise vom Radius A in jeder Sekunde den Weg $A\alpha = A\omega t = A \times 1 \times 1 = A$ zurücklegen, also in 2π, d. h. 6,28 Sekunden den Weg $A \times 2\pi$, d. h. den ganzen Kreisumfang $2\pi A$ durchlaufen haben. Für $\omega = 2$ würde dies schon in 3,14 Sekunden geschehen sein. In der gleichen Zeit würden auch die Punkte P_x und P_y nach einem Hin- und Herschwingen an ihre alte Stelle gelangen.

Man kann sich die sinusförmige Schwingungsbewegung $a = A \sin \omega t$ auch dadurch veranschaulichen, daß man graphisch zu jedem Zeitpunkte den zugehörigen Ausschlag a aufträgt. Man erhält dann die sogenannte Sinuskurve (Fig. 2). Der Ausschlag a ist zunächst null, wächst dann anfangs schnell, später langsamer bis auf den maximalen Betrag $a = A$ an, nimmt wieder bis null ab, nach der anderen, negativen Seite bis $a = -A$ zu und geht schließlich wieder auf null zurück, von wo das Spiel von neuem beginnt. Eine solche Sinuskurve würde z. B. eine an einer Spiralfeder auf und ab schwingende Kugel (Fig. 3) mit Schreibstift auf ein dahinter vorbeigezogenes Blatt Papier aufzeichnen. Eine solche Kugel führt nämlich eine sinusförmige Schwingung aus. Die Sinuskurve läßt den Schwingungsvorgang unmittelbar erkennen, während sich bei der Kreisbewegung noch die zweite dazu senkrechte Schwingung, die physikalisch gar nicht existiert, hineinmischt; daher soll im folgenden mehr auf die Darstellung durch die Sinuskurve Bezug genommen werden, wobei man sich physikalisch am besten die an der Feder auf und abschwingende Kugel vorstellt.

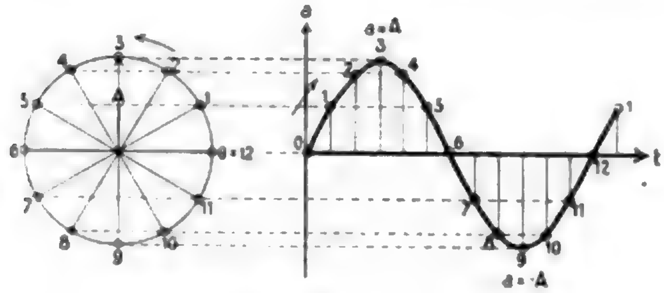


Fig. 2.

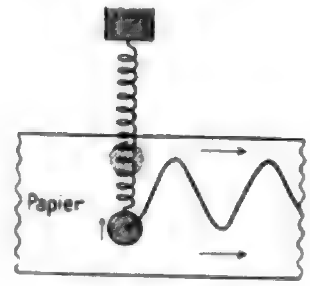


Fig. 3.

1c) Konstruktion von Sinuskurven. Die Kurve $y = \sin x$ (Fig. 4) schneidet die

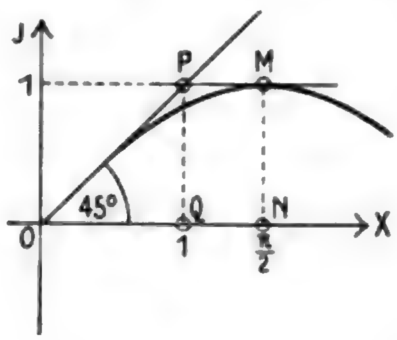


Fig. 4.

X-Achse unter 45°. Man erhält also einen zweiten Punkt P der Tangente, wenn man nach rechts von O bis Q und nach oben von Q bis P die Strecke 1 abträgt. Da die maximale Amplitude $y = 1$ ist, und hier die Tangente MP wagerecht verläuft, umschließt der Linienzug OPM die Sinuskurve möglichst dicht, so daß man die Kurve durch Abrundung der Ecke bei P ziemlich genau erhält.

Da π bis auf 5% gleich 3 ist, liegt der Punkt Q nahezu in $^2/_3$ der Entfernung $ON = \pi/2$. Dies ist ganz allgemein gültig. Man erhält daher bei beliebiger Kurve $y = A \sin \omega t$ den Punkt P sehr angenähert, wenn man auf $^2/_3$ der Strecke ON eine Senkrechte und vom Punkt M aus eine Wagrechte zieht, die sich in P schneiden.

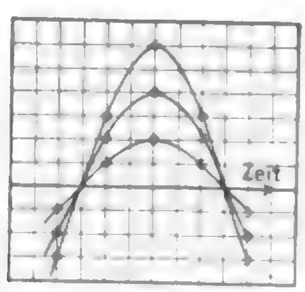


Fig. 5.

Hat man kariertes Papier und genügt eine Annäherung bis auf 5%, so wählt man zweckmäßig den Maßstab so (Fig. 5), daß auf der Zeitaxe 3 Einheiten gleich $^1/_4$ Periode werden, während die maximale Amplitude gleich 2, 4 oder 6 Einheiten ist. Die Sinuslinie geht dann vom Schnittpunkt mit der Zeitachse durch den ersten, zweiten oder dritten Eckpunkt auf der nächsten Senkrechten.

2. Bestimmungsstücke. 2a) [7]Amplitude. Man nennt A die Amplitude der Schwingung. Es ist der größte Ausschlag, der nach beiden Seiten hin von der Ruhelage erreicht wird. Die gesamte Weglänge von der äußersten Lage der einen bis zur äußersten Lage der anderen Seite ist also 2A. Aendert man in der Schwingungsgleichung $a = A \sin(\omega t + \varphi)$ nur die Größe von A, so erhält man beim Vergrößern um das Doppelte die gestrichelte, beim Verkleinern auf die Hälfte die punktierte Kurve in Fig. 6. Beides sind

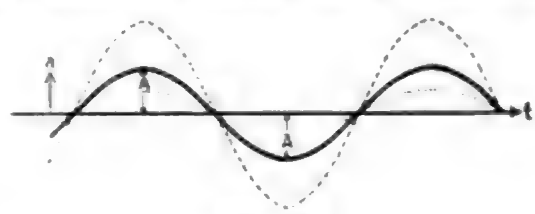


Fig. 6.

natürlich auch Sinuskurven. Die schwingende Kugel in Figur 3 würde sie aufzeichnen wenn sie stärker, resp. schwächer in Schwingungen versetzt würde.

2b) Frequenz. Man nennt ω statt Winkelgeschwindigkeit meist die Kreisfrequenz der Schwingung. Von ihr ist die Dauer eines Hin- und Hergangs abhängig. Es ist bekanntlich $\sin \alpha = \sin(\alpha + 2\pi) = \sin(\alpha + 4\pi)$ usw., d. h. wenn die Größe α um den Betrag von 2π (= 360° im Winkelmaß) vergrößert wird, so ist die Größe des Sinus von α wieder dieselbe. Bei der Kreisdrehung des Punktes P in Figur 1 entspricht $\alpha = 2\pi$ einem vollen Umlauf. Sobald also die Zeit t so weit vorgeschritten ist, daß ωt um 2π größer geworden ist, ist der Schwingungsvorgang $a = A \sin(\omega t + \varphi)$ wieder an derselben Stelle angelangt. Die Zeitdauer einer vollen Schwingung bestimmt sich hiernach aus der Gleichung $\omega t_2 - \omega t_1 = 2\pi$

oder $t_2 - t_1 = \frac{2\pi}{\omega} = T$. T nennt man die Schwingungsdauer oder Periode; es ist die Zeit, während der der Ausschlag von null über den höchsten Punkt auf null und über den tiefsten Punkt nochmals auf null zurückgekehrt ist, oder während der sich der Körper vom höchsten Punkt bis zum tiefsten und wieder zum höchsten zurück bewegt. Der Ausschlag ist also während einer halben Periode positiv und während der anderen Hälfte negativ.

Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde, also das Verhältnis der Zeiteinheit zur Schwingungsdauer $1 : T = n$ nennt man die Schwingungszahl oder Frequenz. Es besteht die Gleichung $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$. Man kann also die Schnelligkeit der Schwingungen ganz nach Belieben durch die Periode T, die Frequenz n, oder die Kreisfrequenz ω ausdrücken. Die Kreisfrequenz ω wird nur der bequemeren Schreibweise halber beibehalten, da $\sin 2\pi n t$ oder $\sin 2\pi \frac{t}{T}$ statt $\sin \omega t$ umständlicher zu schreiben ist. Sie entspricht physikalisch der Anzahl Schwingungen in 2π Sekunden. In Figur 7 ist

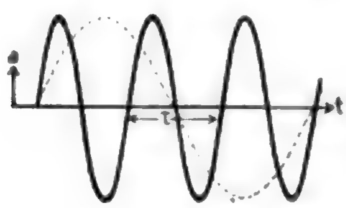


Fig. 7.

dargestellt, wie sich die gestrichelt gezeichnete Sinuskurve von Figur 6 ändert, wenn man ω um das dreifache vergrößert, d. h. also die Frequenz n erhöht, die Periode T verringert.

2c) Phase. Man nennt φ die Phase der Schwingung. Durch die Größe von φ ist gekennzeichnet, in welchem Zustande sich die schwingende Bewegung im Anfangspunkte der Zeitrechnung $t = 0$ befindet. In Figur 8

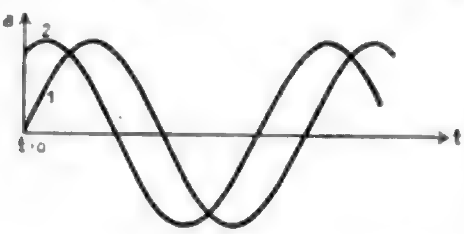


Fig. 8.

sind zwei Sinuskurven von gleicher Amplitude und Frequenz aber verschiedener Phase, nämlich $\varphi_1 = 0$ und $\varphi_2 = \frac{\pi}{6} = 30^0$ gezeichnet. Man kann die beiden Kurven durch wagerechtes Verschieben zur Deckung bringen. Daraus ersieht man, daß es bei Betrachtung nur einer einzigen schwingenden Bewegung keinen rechten Sinn hat von der Phase zu sprechen. Man kann hier den Anfangspunkt der Zeit willkürlich wählen, z. B. zweckmäßig so, daß $\varphi = 0$ wird. Muß aber gleichzeitig noch eine zweite Schwingung berücksichtigt werden, so kann der Phasenunterschied $\varphi_2 - \varphi_1$ sehr wichtig sein. Bei Phasengleichheit $\varphi_2 = \varphi_1$, oder $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ würden z. B. zwei auf- und abschwingende Kugeln immer zur selben Zeit in die Höhe und wieder herunter gehen, bei einem Phasenunterschiede von $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$ würde dagegen die erste gerade in die Höhe gehen, während die andere herabsinkt. Sobald daher die Wirkung beider Kugeln in Betracht zu ziehen ist, werden beide Fälle verschiedene Erscheinungen zur Folge haben. Haben zwei Schwingungen dieselbe Frequenz und dieselbe Phase, schwingen sie also genau im Takte gleichzeitig auf- und abwärts, so sagt man, sie schwingen synchron. — Da $\cos \alpha = \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right)$ ist, so ist eine cos-Schwingung gegen eine sin-Schwingung um $\frac{\pi}{2} = 90^0$ in der Phase verschoben. Ebenso ist $-\sin \alpha = \sin (\alpha + \pi)$, also um $\pi = 180^0$ gegen $+\sin \alpha$ verschoben. In etwas anderer Bedeutung spricht man auch wohl bei einer einzigen schwingenden Bewegung von ihren verschiedenen Phasen und meint damit die verschiedenen Zustände während einer Periode, sagt z. B. „nach einer Periode herrscht wieder dieselbe Phase, nach einer halben Periode die entgegengesetzte Phase", Bezeichnungen wie sie z. B. auch für das periodisch wechselnde Aussehen des Mondes im Gebrauch sind.

3. Kinematik. Außer dem Ausschlage ist auch die Geschwindigkeit und Beschleunigung der schwingenden Bewegung von Wichtigkeit.

3a) Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit wird durch die Formel $v = \frac{da}{dt}$ bestimmt, d. h. sie ist um so größer, je stärker sich der Ausschlag a während einer bestimmten kleinen Zeit ändert, oder in der graphischen Darstellung durch die Sinuskurve, je steiler diese Kurve verläuft. Bei aufsteigender Kurve (Aenderung „da" positiv) ist die Geschwindigkeit positiv, bei absteigender Kurve negativ. Man erkennt daher sowohl aus der graphischen Darstellung Figur 9a wie auch aus dem

physikalischen Vorgang bei der schwingenden Kugel, daß die Geschwindigkeit beim Passieren der Ruhelage, also beim Ausschlag $a = 0$ am größten und an den Umkehrpunkten beim größten Ausschlage $a = \pm A$ am kleinsten, nämlich 0 wird, denn hier verläuft die Kurve ein kleines Stück wagerecht, d. h. der Ausschlag ändert sich einen kurzen Augenblick gar nicht mit der Zeit.

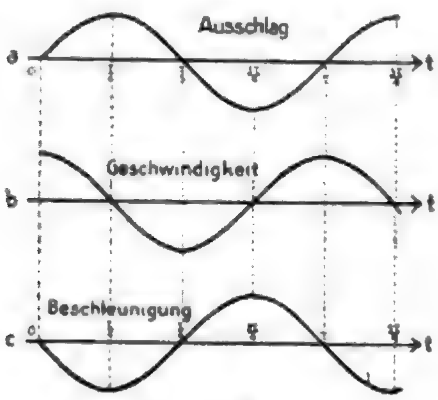


Fig. 9.

In Figur 9b ist die Kurve, die den Verlauf der Geschwindigkeit angibt, gezeichnet. Die mathematische Ausrechnung liefert für $a = A \sin \omega t$

$$v = \frac{da}{dt} = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin (\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Die Geschwindigkeit ändert sich also mit der Zeit auch sinusförmig, hat aber gegen den Ausschlag eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$, derart, daß sie am größten ist, wenn der Ausschlag 0 ist und umgekehrt. Die Frequenz der Geschwindigkeitsschwingung ist dieselbe wie die des Ausschlages. Ihre Amplitude ist einerseits der Amplitude A des Ausschlages proportional, andererseits der Kreisfrequenz ω der Schwingung, da eine schnellere Schwingung natürlich größere Geschwindigkeit bedingt. Eine Klaviersaite, deren Amplitude 1 mm und deren Frequenz $n = 500$ ist, hat z. B. eine maximale Geschwindigkeit von $2\pi . 500 . 1$ mm/sec = 3,14 m/sec, also eine ganz ansehnliche Größe trotz der geringen Amplitude.

3b) Beschleunigung. Die Beschleunigung $b = \frac{dv}{dt}$ ist das Maß der Geschwindigkeitsänderung pro Zeiteinheit, hat also zur Geschwindigkeit die selbe Beziehung, wie die Geschwindigkeit zum Ausschlag. Sie ist groß, wo sich die Geschwindigkeit stark ändert, also wo die Geschwindigkeitskurve durch null geht, und klein wo diese ein Maximum hat. Auch hier ergibt sich aus der graphischen Darstellung (Fig. 9c) sowie aus der genaueren mathematischen Ausrechnung

$$b = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2a}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t$$
$$= \omega^2 A \sin (\omega t + \pi),$$

daß auch die Beschleunigung sinusförmig verläuft mit gleicher Kreisfrequenz ω aber einem Phasenunterschied von $\pi/2$ gegen die Geschwindigkeit, also von π gegen den Ausschlag. Letzteres besagt, daß die Beschleunigung in jedem Augenblick proportional dem momentanen Ausschlag sein muß, nur von entgegengesetztem Vorzeichen, d. h. dem Ausschlag stets entgegen gerichtet.

4. **Mechanik**. 4a) Quasi-elastische Kraft. Da nach dem Grundgesetz der Mechanik eine Beschleunigung stets eine Kraft erfordert, die sie hervorruft und die der Beschleunigung proportional ist, so erfordert eine sinusförmig schwingende Masse eine Kraft, die proportional dem Ausschlag zunimmt und ihm stets entgegen gerichtet ist, d. h. den Ausschlag zu verkleinern bestrebt ist. Eine solche Kraft müssen wir also irgendwie aufwenden, wenn wir eine Masse in sinusförmige Schwingungen versetzen wollen. Solche Kräfte sind aber vielfach von selbst in der Natur, besonders als elastische Kräfte vorhanden. Eine elastische Feder z. B. widersetzt sich dem Zusammendrücken und Ausdehnen mit einer dem Ausschlage proportionalen Kraft, so daß eine an ihr hängende Masse nach einem Anstoße tatsächlich die hier besprochenen sinusförmigen Schwingungen ausführt.

Beim Pendel ist die rücktreibende Komponente der Schwerkraft dem Sinus des Ausschlagwinkels proportional, bei kleinem Winkel also auch sehr nahe dem Ausschlag selbst, so daß auch hier eine solche sogenannte quasi-elastische Kraft vorhanden ist, und die Schwingungen bei kleinen Ausschlägen sinusförmig verlaufen.

4b) Eigenschwingung. Es läßt sich auch umgekehrt zeigen, daß immer wenn eine Masse nur der Einwirkung einer quasi-elastischen Kraft unterliegt, bei irgend welchem Anstoß eine sinusförmige schwingende Bewegung entsteht. Man sagt dann, das betrachtete System besitzt eine Eigenschwingung. Der Satz: Kraft = Masse × Beschleunigung läßt sich mathematisch schreiben

$$-D a = M \frac{d^2a}{dt^2} \text{ oder } M \frac{d^2a}{dt^2} + D a = 0$$

M ist die Masse, $\frac{d^2a}{dt^2}$ die Beschleunigung, $-Da$ die dem Ausschlag a entgegen wirkende und ihm proportionale quasi-elastische Kraft. Der Faktor D drückt die Steifigkeit der quasi-elastischen Kraft aus und ist groß, wenn kleine Ausschläge a schon große

rücktreibende Kräfte Da hervorrufen. Er ist also eine Art Elastizitätsmodul.

Man überzeugt sich durch Ausdifferenzieren leicht, daß die Gleichung durch den Ansatz $a = A \sin(\omega t + \varphi)$ gelöst ist, wenn nur $\omega = \sqrt{\frac{D}{M}}$ ist. A und φ können dagegen beliebig groß sein. Solange nur eine Schwingung betrachtet wird, kommt es, wie schon oben gezeigt wurde, auf die Phase φ nicht an. Man wählt daher am einfachsten den Zeitanfang $t = 0$ so, daß $\varphi = 0$ wird. Die Amplitude A richtet sich nach der Größe des Anstoßes, durch die man die Eigenschwingung erregt hat. Aus der Gleichung für ω folgt für die Frequenz $n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{D}{M}}$, für die Periode $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{D}}$. Eine größere Masse M gibt der Eigenschwingung eine größere Trägheit, verlangsamt sie, eine größere rücktreibende Kraft D beschleunigt sie. Die Aenderung der Schwingungsdauer geht aber nur mit der Wurzel aus beiden Größen vor sich, bei einer Verstärkung der Kraft auf das hundertfache wird die Frequenz nur zehnmal so groß. Besonders wichtig ist, daß die Frequenz gar nicht von der Amplitude A abhängt, daß also bei einmal gegebener Masse und Elastizität ein schwingendes System stets dieselbe Schwingungsdauer besitzt, auch wenn sich die Amplitude der Schwingung ändert. Daher sind solche Systeme mit einer Eigenschwingung zur Zeitmessung hervorragend geeignet und werden zur Uhrenregulierung fast stets benutzt. Die normalen Uhren sind nichts anderes, als ein Zählwerk, das die Anzahl der verstrichenen Eigenschwingungen eines Pendels oder eines elastisch schwingenden Systems (Unruhe) anzeigt.

4c) Energie. Die Energie eines in der Eigenschwingung schwingenden, sich selbst überlassenen Systems setzt sich einerseits aus der kinetischen Energie der Bewegung $\frac{Mv^2}{2}$, andererseits aus der potentiellen Energie, der gegen die quasi-elastische Kraft geleisteten Arbeit zusammen, die z. B. in der gespannten Feder oder dem gehobenen Pendelgewicht besteht. Diese berechnet sich aus Kraft × Weg. Da aber die Kraft Da sich mit dem Wege a ändert, so muß die Arbeit während jedes Wegelementes da summiert werden und man erhält $\int_0^a D a\, da = \frac{Da^2}{2}$.

Figur 10 veranschaulicht graphisch die Summation der Wegelemente „da", die mit der mit a anwachsenden Kraft „Da" multipliziert das schraffierte Dreieck bilden, dessen Inhalt in der Tat $\frac{a . Da}{2} = \frac{Da^2}{2}$ ist. — Während der Schwingung, wo $a = A \sin \omega t$ ist, ändern

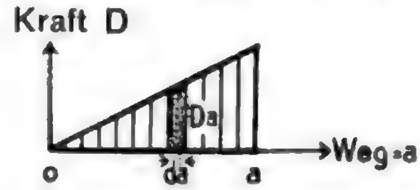


Fig. 10.

sich auch die kinetische und potentielle Energie, und zwar ergibt sich für die erstere bei Beachtung von $\omega = \sqrt{\frac{D}{M}}$:

$$\frac{Mv^2}{2} = \frac{M}{2}(A\,\omega\, t \cos \omega t)^2 = \frac{D}{2} A^2 \cos^2 \omega t,$$

für die potentielle Energie

$$\frac{Da^2}{2} = \frac{D}{2} A^2 \sin^2 \omega t.$$

Beide sind also in ihrem Maximalwert gleich groß, erreichen diesen aber zu verschiedenen Zeiten. Für $\omega t = 0, \pi, 2\pi$ usw., also beim Durchgang durch die Mittellage $a = 0$, ist die kinetische Energie ein Maximum die potentielle null. Für $\omega t = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2} \ldots$, also in den Umkehrpunkten der Bewegung bei $a = \pm A$, ist die potentielle Energie ein Maximum, die kinetische null. Die Summe beider Energien zu beliebiger Zeit ist

$$\frac{D}{2} A^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = \frac{D}{2} A^2$$

also zu allen Zeiten gleich groß. Das war nach dem Satze von der Erhaltung der Energie zu erwarten, da ja das schwingende System ohne alle äußeren Einwirkungen sich selbst überlassen blieb. Vom physikalischen Standpunkte aus kann man hiernach als das Wesen einer Eigenschwingung den periodischen Austausch einer bestimmten Energiegröße zwischen zwei verschiedenen Energieformen ansehen. Man beachte noch, daß die Energie proportional dem Quadrate der Amplitude, also bei doppelter Amplitude viermal so groß ist. Formt man den Ausdruck für die Energie um in $\frac{M\omega^2 A^2}{2}$, so erkennt man, daß unter verschiedenen Eigenschwingungen von gleicher Masse und gleicher Energie der Ausschlag A um so kleiner werden muß, je größer ihre Frequenz ω ist. Daher geben ein Pendel und eine an einer Feder langsam auf und ab schwingende

Kugel leicht große, deutlich wahrnehmbare Ausschläge. Die schnellen Schwingungen dagegen, deren hohe Frequenz wir aus der durch sie erzeugten Tonhöhe schätzen können, besitzen meist nur ganz kleine, kaum sichtbare Ausschläge. Bei den Klaviersaiten kann man sie an einem Dickerwerden der schwingenden Saiten eben noch erkennen, aber nur bei den langsameren Schwingungen, den tiefen Tönen.

5. Dämpfung. 5a) Ursache. Die bisherigen Formeln liefern unbegrenzt lange andauernde Eigenschwingungen, die ihre ihnen einmal mitgeteilte Schwingungsenergie unvermindert beibehalten. Die wirklichen Schwingungen besitzen aber immer eine gewisse Dämpfung, da jede Bewegung mit Energieverlust verbunden ist. Ein angestoßenes Pendel schwingt mit der Zeit immer weniger weit aus und kommt schließlich zur Ruhe. Die ihm durch den Anstoß mitgeteilte Energie geht der Schwingung allmählich verloren. Es entsteht eine gedämpfte oder abklingende Schwingung. Die Ursachen der Dämpfung, des Energieverlustes sind im wesentlichen die verschiedenen Reibungen im Lager, gegen die Luft, in den elastisch bewegten Teilen, ferner auch unvollkommene Elastizität, Fortleitung der Bewegung auf andere Körper, besonders an den Befestigungspunkten und durch Strahlung. Letztere tritt hauptsächlich bei sehr schnellen Schwingungen auf und besteht dann in der Aussendung von Tönen. Vielfach wendet man auch absichtlich dämpfende Mittel an, um eine störend auftretende Eigenschwingung möglichst rasch zu dämpfen, z. B. bei den elektrischen Zeigerinstrumenten, den Erdbebenpendeln und ähnlichen Indikatoren. Bei allen diesen Instrumenten ist eine quasi-elastische Kraft vorhanden, die das bewegliche System in die Einstelllage zu treiben sucht, gleichzeitig aber den Anlaß zu Eigenschwingungen gibt, die eine schnelle Ablesung verhindern und bei schreibenden Instrumenten eine Verzerrung der Kurven bewirken. Als reibungslose Dämpfungen, die keinerlei Verstellung der Ruhelage herbeiführen, sondern nur während der Bewegung wirken, verwendet man besonders die Luftdämpfung (Fig. 11), bei der ein mit dem schwingenden System A verbundener Kolben B sich mit engem Spielraum in einem einseitig geschlossenen Zylinder C bewegt, die Flüssigkeitsdämpfung, bei der ein oder mehrere Flügel, die an der Bewegung teilnehmen in eine ruhende Flüssigkeit eintauchen, oder die bei elektrischen Meßinstrumenten besonders beliebte elektromagnetische Dämpfung, bei der sich eine Kupfer- oder Aluminiumscheibe zwischen den eng zusammengebogenen Polen eines Hufeisenmagnets bewegt. Die Energie wird im letzten Falle durch die in der bewegten Scheibe auftretenden elektrischen Wirbelströme verzehrt.



Fig. 11.

Das Grundgesetz der Mechanik besagt, daß jede Aenderung einer Bewegung durch eine Kraft hervorgerufen werden muß. Die Aenderung der Eigenschwingung durch die Dämpfung werden wir daher auch als eine Dämpfungskraft betrachten, die zu der quasi-elastischen Kraft hinzu kommt. Diese Dämpfungskraft wird erst durch die schwingende Bewegung selbst hervorgerufen und hängt im allgemeinen, z. B. bei der Flüssigkeitsdämpfung, in ziemlich komplizierter Weise von dem Bewegungszustand ab. In einfacher Weise lassen sich nur zwei Fälle übersehen: Erstens der Fall, daß die Dämpfungskraft proportional der Geschwindigkeit zunimmt und ihr natürlich entgegen gerichtet ist, also den Wert $-R\frac{da}{dt}$ besitzt, wobei die positive konstante Größe R die Stärke der Dämpfung charakterisiert. Dieser Fall ist bei rein elektromagnetischer Dämpfung mit großer Genauigkeit erfüllt. Zweitens der Fall, daß die Dämpfungskraft unabhängig von der Geschwindigkeit dauernd dieselbe Größe hat, aber immer der Geschwindigkeit entgegen wirkt, also ihre Richtung sprunghaft umkehrt, wenn die Geschwindigkeit von positiven zu negativen Werten übergeht. Dieser Fall ist mit weniger großer Genauigkeit bei der Dämpfung durch mechanische Reibung vorhanden. Der erste Fall, die „reibungslose Dämpfung", ist der physikalisch wichtigere und sei daher zunächst besprochen.

5b) Reibungslose Dämpfung. Die Gleichung Masse × Beschleunigung = Summe der Kräfte lautet jetzt

$$M\frac{d^2a}{dt^2} = -R\frac{da}{dt} - Da$$

$$\text{oder}\quad M\frac{d^2a}{dt^2} + R\frac{da}{dt} + Da = 0.$$

Ihre Lösung ist $a = A\,e^{-\delta t}\sin(\omega t + \varphi)$ [$e = 2{,}718$ = Basis der natürlichen Logarithmen], wovon man sich durch Einsetzen in die Gleichung überzeugen kann. Es muß nur

$$\delta = \frac{R}{2M} \text{ und } \omega = \sqrt{\frac{D}{M} - \left(\frac{R}{2M}\right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

sein, während A und φ wieder willkürlich sind.

Mit $\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{M}}$ ist dabei die Kreisfrequenz bezeichnet, die das schwingende System ohne Dämpfung besitzen würde, eine Formel, die mit der früher abgeleiteten natürlich übereinstimmt. Man kann den Ausdruck für a wieder als eine Sinusschwingung auffassen, nur ist die Amplitude $Ae^{-\delta t}$ dieser Schwingung nicht mehr konstant, sondern nimmt mit wachsender Zeit ab, da $e^{-\delta t} = \frac{1}{e^{\delta t}}$ mit größer werdendem t immer kleiner wird. Man kann sich auch hier den zeitlichen Verlauf der Schwingung graphisch veranschaulichen und zeichnet zu diesem Zwecke zunächst die beiden Amplitudenkurven $Ae^{-\delta t}$ (Fig. 12). Die ganze Bewegung muß dann innerhalb dieser beiden Kurven bleiben, da das Sinusglied höchstens die Werte ± 1 annehmen kann. Je größer der Dämpfungsfaktor δ ist, desto schneller nähern sich die Amplitudenkurven der Nullinie (vgl. Fig. 13). Jedesmal nach Verstreichen einer durch eine Schwingungsdauer, voneinander. Die Amplitudenkurve ist während dessen von $e^{-\delta t}$ auf $e^{-\delta(t+T)}$ gefallen. Das Verhältnis zweier aufeinander folgender Ausschläge ist also

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{e^{-\delta t}}{e^{-\delta(t+T)}} = e^{\delta T} = e^{\mathfrak{d}}$$

wenn $\mathfrak{d} = \delta T$ gesetzt wird. Man nennt $\mathfrak{d} = \log nat \frac{A_1}{A_2}$ das **logarithmische Dekrement** oder auch kurz nur das Dekrement der Schwingung. Es gibt an, wie stark sich der maximale Ausschlag gegenüber dem vorhergehenden verkleinert. In Figur 12 war der Verlauf der Schwingung für ein Dekrement $\mathfrak{d} = 0{,}1$ $\left(\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{0{,}90}\right)$, in Figur 13 ist er für dieselbe Schwingung, nur mit einer zehnmal so starken Dämpfung nämlich $\mathfrak{d} = 1$ $\left(\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{0{,}37}\right)$ gezeichnet.

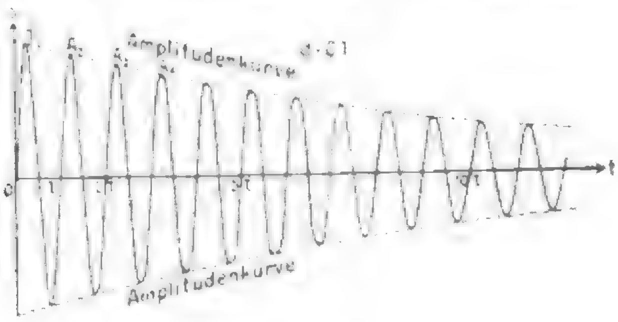


Fig. 12.

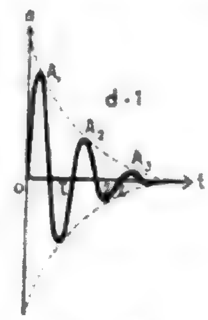


Fig. 13.

$t_2 - t_1 = \frac{1}{\delta}$ sec bestimmten Zeit ist die Amplitudenkurve auf $\frac{1}{e} = 0{,}37$ ihrer ursprünglichen Größe gesunken. Für $\delta = 2$ ist z. B. die Amplitude nach $\frac{1}{2}$ sec auf $\frac{1}{e} = 0{,}37$, nach 1 sec auf $\frac{1}{e^2} = 0{,}14$, nach $1\frac{1}{2}$ sec auf $\frac{1}{e^3} = 0{,}05$, d. i. $^1/_{20}$ und nach 3 sec auf $\frac{1}{e^6} = \left(\frac{1}{e^3}\right)^2 = {}^1/_{400}$ des ursprünglichen Wertes abgeklungen. Nimmt die Zeit in einer arithmetischen Reihe zu, so nimmt die Amplitudenkurve in einer geometrischen Reihe ab. Die Stärke dieser Abnahme ist durch den Dämpfungsfaktor δ charakterisiert.

Für die maximalen Ausschläge der Schwingung A_1, A_2, A_3 usw., bei denen die Schwingungskurve die Amplitudenkurve berührt, ergibt sich eine einfache Beziehung. Diese Ausschläge haben zeitlich alle denselben Abstand T,

Da der zeitliche Abstand zweier Ausschläge immer gleich T bleibt, so ist das Verhältnis je zweier aufeinander folgender Ausschläge immer dasselbe. Die maximalen Ausschläge A_1, A_2, A_3 usw. nehmen während der Schwingung in einer geometrischen Reihe ab. Das logarithmische Dekrement $\mathfrak{d} = \delta T$, das die Stärke dieser Abnahme kennzeichnet, stellt die Dämpfung bezogen auf die Schwingungsdauer T als Zeiteinheit dar, während der Dämpfungsfaktor δ sich auf die absolute Zeiteinheit, die Sekunde bezieht. Die Saiten eines Klaviers haben alle nahezu dasselbe Dekrement, d. h. sie geben pro Schwingung etwa die gleiche Energie ab; daher ist der Dämpfungsfaktor bei den hohen Tönen viel größer, diese klingen viel schneller ab als die tiefen, da sie pro Sekunde viel mehr Schwingungen machen. Das Dekrement ist das Maß für die Stärke der Resonanz (vgl. den Artikel „Erzwungene Schwingungen"). Auch die prozentuale Aenderung der Schwingungsdauer durch die Dämpfung hängt vom Dekrement ab, während die weniger anschau-

liche absolute Aenderung durch den Dämpfungsfaktor bestimmt ist. Wie oben angegeben wird die Kreisfrequenz ω durch die Dämpfung auf $\sqrt{\omega_0^2-\delta^2}$ gegenüber ω_0 verringert; daraus folgt, daß die ω umgekehrt proportionale Schwingungsdauer T im Verhältnis $\sqrt{1+\left(\frac{\mathfrak{d}}{2\pi}\right)^2} : 1$ vergrößert wird. Diese Vergrößerung ist aber praktisch immer sehr klein, z. B. bei der sehr starken Dämpfung $\mathfrak{d}=1$ (Fig. 13) beträgt der Unterschied nur etwa 1 %, für $\mathfrak{d}=0{,}1$ (Fig. 12) nur 0,01 %, ist also praktisch zu vernachlässigen. Die Tonhöhe der angeschlagenen Klaviersaiten wird daher durch die Dämpfung nicht geändert, da für diese das Dekrement stets wesentlich kleiner als 1 bleibt.

Wird der Dämpfungsfaktor δ größer als ω_0, so wird $\omega=\sqrt{\omega_0^2-\delta^2}$ imaginär. Als Lösung der Schwingungsgleichung erhält man dann

$$a = A\,e^{-\left(\delta+\sqrt{\delta^2-\omega_0^2}\right)t} - B\,e^{-\left(\delta-\sqrt{\delta^2-\omega_0^2}\right)t}$$

Das bedeutet, es treten überhaupt keine Schwingungen mehr auf. Die Bewegung nähert sich der Ruhelage, ohne über sie hinaus zu schwingen (Fig. 14). Man sagt die Einstellung sei aperiodisch. Ist die Dämpfung sehr groß, so wird die Bewegung sehr langsam, die Einstellung dauert sehr lange (Fig. 15), man sagt dann, sie sei kriechend oder überaperiodisch. Die schnellste Einstellung erhält man im aperiodischen Grenzfall (Fig. 14), wenn $\delta=\omega_0$ wird, bei einer um weniges verringerten Dämpfung also die Bewegung schon über die Ruhelage hinaus schwingen würde. Diesen aperiodischen Grenzfall sucht man bei Zeigerinstrumenten durch geeignete Wahl der Dämpfung nach Möglichkeit zu erreichen.

5c) Reibungsdämpfung. Der zweite Fall, die „Reibungsdämpfung", bei der die Dämpfungskraft eine konstante Größe ist, läßt sich am besten graphisch übersehen. Eine konstante Kraft bewirkt nichts anderes als eine Veränderung der Ruhelage. Die Schwingungen verlaufen daher gerade so als ob keine Dämpfung vorhanden wäre, also sinusförmig, nur daß die Ruhelage der Schwingung eine andere ist und sich bei Umkehr der Bewegung sprungweise ändert. Diese scheinbare Ruhelage ist in Figur 16 punktiert eingezeichnet. Sie ändert sich jedesmal, wenn der Ausschlag in den Punkten A_1, A_2, A_3 usw. umkehrt, also alle halben Perioden. Ihr Abstand von der eigentlichen Nullage sei r. Dann wird (Fig. 16) $B_1=A_1-r=A_2+r$ also $A_1-A_2=2r$, ebenso $B_2=A_2-r=A_3+r$ also $A_2-A_3=2r$, jeder Ausschlag ist gegen den vorhergehenden um 2r kleiner, die Amplitudenkurve ist also eine abfallende gerade Linie, die Ausschläge nehmen in einer arithmetischen Reihe ab. Zum Schlusse bleibt eine dauernde Abweichung der Ruhelage von der Nullage bestehen, deren Größe $\pm$r oder weniger betragen kann, je nachdem wie die letzte Schwingung gerade endigt. Bei größerer mechanischer Reibung tritt tatsächlich immer eine solche Abweichung ein. Man muß daher ein Zeigerinstrument mit Reibung (Barometer) erst klopfen und dadurch die Reibung aufheben, ehe man abliest. Eine Dämpfung durch mechanische Reibung muß also bei Zeigerinstrumenten nach Möglichkeit vermieden werden und darf z. B. nicht benutzt werden, wenn die schwingende Einstellung aperiodisch gemacht werden soll. Die im ersten Fall besprochene reibungslose Dämpfung wirkt dagegen auf die Nullage nicht verstellend ein, da sie im gleichen Maße wie die Geschwindigkeit abnimmt, in der Ruhelage also Null ist. Durch die elektromagnetische oder auch die Luft- oder Flüssigkeitsdämpfung kann man die Einstellung beliebig stark dämpfen, z. B. über den aperiodischen Grenzfall hinaus sehr verlangsamen, ohne dadurch in der endgültigen Ruhelage irgendeine Abweichung von der wirklichen Nullage zu erhalten.

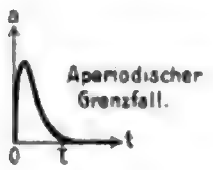


Fig. 14.

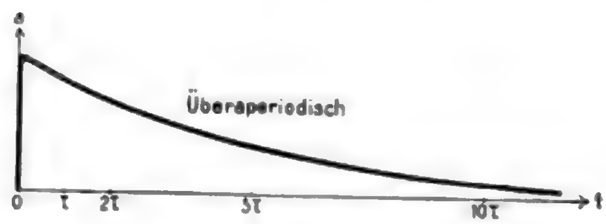


Fig. 15.

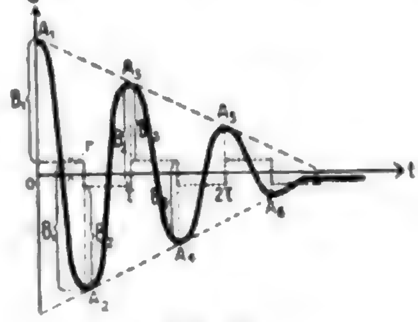


Fig. 16.

Eine Aenderung der Frequenz tritt bei der Reibungsdämpfung überhaupt nicht ein. Der Unterschied gegenüber der reibungslosen Dämpfung besteht besonders darin, daß die prozentuale Dämpfung — von einem logarithmischen Dekrement darf man hier genau genommen nicht sprechen — anfangs klein, gegen Ende der Schwingung dagegen sehr groß wird.

6. Elektrische Schwingungen. 6a) Wechselströme. Die für die sinusförmige Schwingung abgeleiteten Gesetze gelten, wie schon anfangs bemerkt, ganz allgemein; und wenn wir bisher nur mechanische Beispiele angeführt haben, so geschah dies der größeren Anschaulichkeit wegen. Elektrisch spielen aber die Sinusschwingungen fast eine noch größere Rolle. Dies hängt mit der engen Beziehung der Sinusschwingung zur Rotationsbewegung zusammen. Die elektrischen Ströme werden nämlich in den Dynamomaschinen durch Rotation von Leitern in einem Magnetfelde erzeugt, wie dies schematisch in Figur 17 angedeutet ist. In dem gezeichneten Rahmen

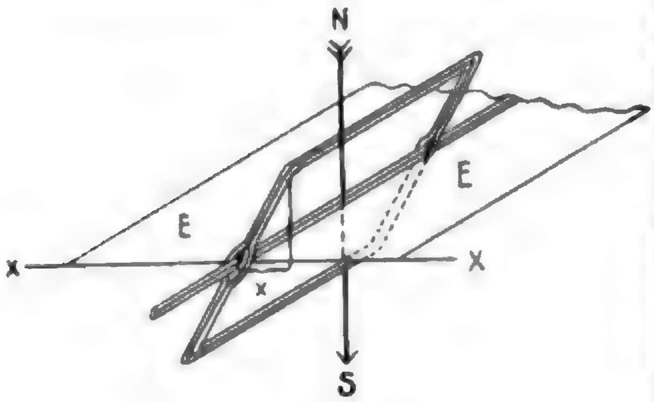


Fig. 17.

werden elektromotorische Kräfte induziert, die gleich der zeitlichen Aenderung der Zahl der die Rahmenfläche durchsetzenden magnetischen Kraftlinien sind. Diese Kraftlinienzahl ist bei senkrechtem Magnetfeld N—S proportional der Projektion der Fläche auf eine wagrechte Ebene E, also proportional der Länge x der Projektion einer Rahmenkante auf die X—X-Achse. Rotiert daher der Rahmen mit gleichmäßiger Geschwindigkeit, so ändert sich x sinusförmig. Von einer solchen Rotation waren wir ja gerade bei der Bestimmung der Sinusschwingung ausgegangen. Die elektromotorischen Kräfte in den Dynamomaschinen haben daher zunächst stets nahezu sinusförmigen Verlauf und erzeugen, wenn sie nicht durch einen Kollektor gleichgerichtet werden, einen nahezu sinusförmig hin und her schwingenden Strom, den sogenannten Wechselstrom (siehe den Artikel „Wechselströme"), der in der Technik eine außerordentlich wichtige Rolle spielt.

6b) Eigenschwingungen. Andererseits gibt es elektrisch auch Systeme mit einer Eigenschwingung. Die beiden, sich wechselseitig ineinander umsetzenden Energien sind die elektrische Energie eines geladenen Kondensators und die magnetische Energie einer stromdurchflossenen Spule. Erstere entspricht (vgl. Tabelle) der potentiellen Energie, die Spannung am Kondensator ist die quasi-elastische Kraft, die proportional der Aufladung des Kondensators zunimmt, und der Aufladung entgegenwirkt. Die magnetische Energie entspricht andererseits der kinetischen. Sie ist proportional dem Quadrate der Stromstärke, d. h. der Ladegeschwindigkeit und erzeugt wie die Trägheitskraft bei bewegten Massen eine sogenannte induzierte Kraft, die sich jeder Aenderung der momentan vorhandenen Ladegeschwindigkeit widersetzt Dadurch entsteht auch hier eine sinusförmige Schwingung, die auch praktisch stets gedämpft verläuft. Die Dämpfungsursache ist meist ausschließlich der Ohmsche Widerstand der Stromspule, der beim Stromdurchgang eine Wärmeentwickelung, d. h. eine Umwandlung der Schwingungsenergie in Wärme bedingt. Der Ohmsche Spannungsabfall entspricht der Dämpfungskraft und ist genau proportional der Stromstärke, d. h. der Ladegeschwindigkeit. Es liegt also hier genau der erste Fall der reibungslosen Dämpfung mit in geometrischer Reihe abklingenden Amplituden vor (Fig. 12 und 13). Die genauen Formeln, die das beste Bild von dem vollständigen Parallelismus der mechanischen und elektrischen Schwingungen geben, sind in der Tabelle weiter unten zusammengestellt. Die einzige, nicht genau analoge Größe ist die Kapazität, die dem reziproken Elastizitätsmodul entspricht. Das liegt daran, daß der Elastizitätsmodul um so größer ist, je weniger nachgiebig, d. h. je unelastischer ein Körper ist. Es ist also rein zufällig, daß nicht der reziproke Wert 1/D, durch einen anderen Buchstaben bezeichnet, in die Rechnung eingeführt wurde.

Diese durch zahlreiche Experimente aufs genaueste bestätigte Theorie der Kondensatorenentladungen stammt von W. Thomson (1855), die Formel $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ für die Schwingungsdauer wird daher als die Thomsonsche Formel bezeichnet.

Es sei noch bemerkt, daß es auch auf elektrischem Gebiete eine dem zweiten Falle der Reibungsdämpfung entsprechende Dämpfung gibt, bei der die Amplituden in arithmetischer Reihe abnehmen (vgl. Fig. 16). Ein elektrischer Lichtbogen erzeugt nämlich bei schnellen Schwingungen eine Gegen-

spannung, deren Höhe bei großen Stromstärken nahezu unabhängig von der Stromstärke aber ihr stets entgegen gerichtet ist. Der Funke, der die Kondensatorenentladungen meist einleitet, ist aber nichts anderes als ein solcher Lichtbogen. Und wirklich hat sich experimentell bestätigt, daß bei einer Dämpfung der Schwingungen durch den Funken die Amplituden der Schwingungen tatsächlich wie in Figur 16 gezeichnet abnehmen.

6c) Analogie elektrischer und mechanischer Schwingungen.

Mechanisch	Elektrisch
Ausschlag a	Ladung a
Geschwindigkeit $v = \frac{da}{dt}$	Stromstärke $i = \frac{da}{dt}$
1/Elastizitätsmodul 1/D	Kapazität C
Elastische Kraft Da	Kondensatorspannung a/C
Potentielle Energie $D\frac{a^2}{2}$	Elektrostatische Energie $1/C\frac{a^2}{2}$
Träge Masse M	Selbstinduktion L
Trägheitskraft $M\frac{dv}{dt} = M\frac{d^2a}{dt^2}$	Induzierte Kraft $L\frac{di}{dt} = L\frac{d^2a}{dt^2}$
Kinetische Energie $M\frac{v^2}{2}$	Magnetische Energie $L\frac{i^2}{2}$

a) Ohne Dämpfung

$M\frac{d^2a}{dt^2} + Da = 0$ Kräftegleichgewicht oder Schwingungsgleichung $L\frac{d^2a}{dt^2} + \frac{1}{C}a = 0$

$a = A\sin 2\pi\frac{t}{T_0}$ Lösung $A = A\sin 2\pi\frac{t}{T_0}$

$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{M}{D}}$ Schwingungsdauer $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$

b) Mit (reibungsloser) Dämpfung

Dämpfungskoeffizient R	Ohmscher Widerstand R
Dämpfungskraft $Rv = R\frac{da}{dt}$	Ohmscher Spannungsabfall $Ri = R\frac{da}{dt}$

$M\frac{d^2a}{dt^2} + R\frac{da}{dt} + Da = 0$ Kräftegleichgewicht oder Schwingungsgleichung $L\frac{d^2a}{dt^2} + R\frac{da}{dt} + \frac{a}{C} = 0$

$a = A\,e^{-\delta t}\sin 2\pi\frac{t}{T}$ Lösung $a = A\,e^{-\delta t}\sin 2\pi\frac{t}{T}$

Schwingungsdauer

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{M} - \left(\frac{R}{2M}\right)^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\delta T_0}{2\pi}\right)^2}} \qquad T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\delta T_0}{2\pi}\right)^2}}$$

$\delta = \frac{R}{2M}$ Dämpfungsfaktor $\delta = \frac{R}{2L}$

II. Zerlegung und Zusammensetzung von Schwingungsbewegungen.

1. Zerlegung nicht sinusförmiger in sinusförmige Schwingungen. Bei der großen Einfachheit und dem häufigen Vorkommen der sinusförmigen Bewegung ist es für die mathematische Behandlung und das physikalische Verständnis der nicht sinusförmigen schwingenden Bewegungen von großer Wichtigkeit, daß diese sich nach dem Fourierschen Theorem (s. den Artikel „Fouriersches System") stets auf eine Reihe von sinusförmigen Bewegungen zurückführen lassen, deren Perioden in ganzzahligem Verhältnis stehen, d. h. sich wie 1:2:3.... verhalten. Dies ist so zu verstehen, daß die nicht sinusförmige Bewegung durch die gleichzeitige Ausführung von mehreren sinusförmigen ersetzt wird, derart, daß der momentane wirkliche Ausschlag stets gleich der Summe der momentanen fiktiven, sinusförmig wechselnden Ausschläge ist. Dadurch lassen sich viele Fragen wieder auf die ein, fache sinusförmige Bewegung zurückführen besonders dann, wenn die Abweichungen von

der Sinusform gering sind, so daß die höheren, harmonischen Glieder der Fourierschen Reihe nur als Korrektur zu betrachten sind. In anderen Fällen, z. B. beim Pendel, das bei großen Ausschlägen nicht mehr sinusförmig schwingt, da dann die rücktreibende Kraft nicht mehr proportional dem Ausschlag ist, hat man es vorgezogen, von der Sinusfunktion ganz abzugehen und für die hier vorliegende Abhängigkeit des Ausschlages von der Zeit neue Funktionen, die sogenannten elliptischen oder Besselschen Funktionen einzuführen, d. h. sie ebenso wie die Sinusfunktionen tabellarisch festzulegen, zumal diese Abhängigkeiten auch in anderen Gebieten der Physik auftreten.

2. **Zusammensetzung sinusförmiger Schwingungen.** Das umgekehrte Problem, die Zusammensetzung mehrerer schwingender Bewegungen zu einer Resultierenden tritt auch häufig in der Physik auf, z. B. wenn zwei elektrische Wechselströme zusammenfließen, oder wenn mehrere Wellenbewegungen sich überlagern. Wir wollen zunächst den Fall betrachten, daß alle Einzelbewegungen in dieselbe Richtung fallen, so daß die resultierende Gesamtbewegung einfach die algebraische Summe der Einzelbewegungen ist.

2a) Gleiche Frequenzen. Hier gilt zunächst der wichtige Satz, daß mehrere Sinusschwingungen gleicher Frequenz stets wieder eine Sinusschwingung gleicher Frequenz ergeben, ganz gleichgültig, wie groß die Amplituden und Phasen der einzelnen Schwingungen sind. Man kann also durch noch so vielseitige Kombination gleicher Sinusschwingungen keinerlei neuartige Erscheinungen erzielen. Der Beweis läßt sich rechnerisch am einfachsten dadurch führen, daß man zunächst alle Einzelschwingungen $a_1, a_2, a_3 \ldots$ zerlegt nach der Formel

$$\begin{aligned} a &= A \sin(\omega t - \varphi) \\ &= A \cos\varphi \sin\omega t + A \sin\varphi \cos\omega t \\ &= B \sin\omega t + C \cos\omega t \end{aligned}$$

wobei $B = A\cos\varphi$; $C = A\sin\varphi$ also $\sqrt{B^2 + C^2} = A$; $C/B = \operatorname{tg}\varphi$ ist. Die resultierende Schwingung läßt sich dann in gleicher Weise wieder zusammensetzen:

$$\begin{aligned} a_r &= a_1 + a_2 + a_3 + \ldots \\ &= (B_1 + B_2 + \ldots) \sin\omega t + (C_1 + \ldots) \cos\omega t \\ &= B_r \sin\omega t + C_r \cos\omega t \\ &= A_r \sin(\omega t - \varphi_r) \end{aligned}$$

Dieser Beweis liefert eine einfache geometrische Konstruktion der resultierenden Schwingung, wenn man die Schwingungen wie anfangs besprochen als rotierende Punkte darstellt. Dann sind nämlich die Komponenten $B = A\cos\varphi$ und $C = A\sin\varphi$ nichts anderes als die Projektionen x und y in dem Augenblick, in dem $t = 0$ ist. Es ist dann also $x_r = x_1 + x_2 + x_3 \ldots$ und $y_r = y_1 + y_2 + y_3 \ldots$ Dadurch ergibt sich ohne weiteres die in Figur 18 gezeichnete, dem Parallelogramm der Kräfte entsprechende Zusammensetzung der beiden Schwingungen A_1 und A_2 zu A_r.

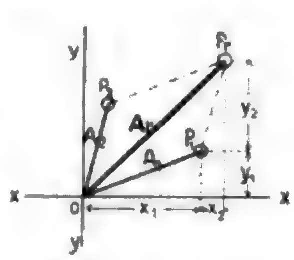


Fig. 18.

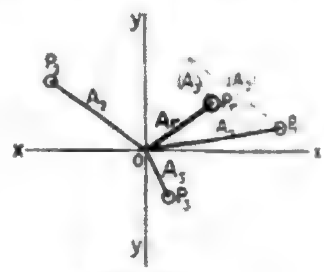


Fig. 19.

In Figur 19 ist in gleicher Weise die Zusammensetzung von drei Schwingungen dargestellt, wobei die Hilfslinien weggelassen sind. Diese Zusammensetzung gilt nicht nur für $t = 0$, sondern für alle Zeiten. Denn mit wachsender Zeit rotieren alle Punkte P_1 P_2 P_3 P_r mit gleicher Geschwindigkeit um den Mittelpunkt O; der Linienzug bleibt in seiner gegenseitigen Lage unverändert, rotiert wie eine starre Verbindung. Hätten die einzelnen Schwingungen dagegen verschiedene Frequenzen, würden also die Punkte P verschieden schnell umlaufen, so würde die Zusammensetzung zu jeder Zeit ein anderes Resultat ergeben, ihre einfache Bedeutung also verlieren.

Man kann natürlich die Sinuskurve der resultierenden Schwingung auch aus den Sinuskurven der einzelnen Schwingungen konstruieren (Fig. 20), indem man die einzelnen Ordinaten a_1 und a_2 überall zu a_r zusammensetzt. Wo $a_2 = 0$ ist wird $a_r = a_1$, d. h. die beiden Kurven für a_r und a_1 schneiden sich dort. Ebenso schneiden sich die a_r- und a_2-Kurven dort, wo $a_1 = 0$ ist. Man sieht auch hier, daß die dick gezeichnete resultierende Schwingung sinusförmigen Verlauf hat.

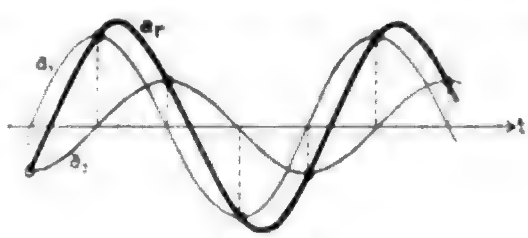


Fig. 20.

Die Amplitude der resultierenden Schwingung braucht nicht stärker zu sein als die der Einzelschwingungen, wie schon der Fall von Figur 19 zeigt. Insbesondere ergeben zwei Schwingungen von gleicher Amplitude eine resultierende Schwingung von der Amplitude null (Fig. 21 und 22), wenn die

Phasenverschiebung $\pi = 180^\circ$ beträgt (Interferenz) und eine resultierende Schwingung derselben Amplitude (Fig. 23 und 24), wenn die Phasenverschiebung $^2/_3\,\pi = 120^\circ$ beträgt.

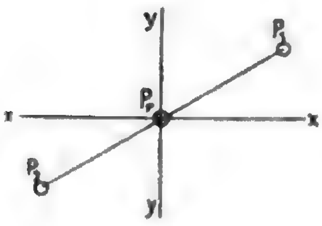


Fig. 21.

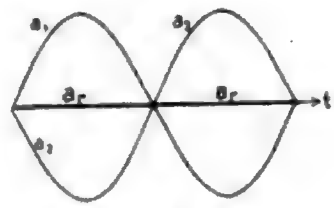


Fig. 22.

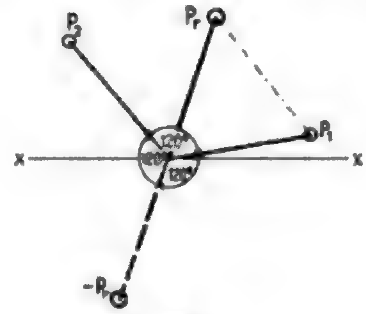


Fig. 23.

Die negative resultierende Schwingung ist in letzterem Falle gegen beide um 120° in der Phase verschoben. Drei Schwingungen von gleicher Größe und je 120° Phasenverschiebung gegen einander ergeben demnach insgesamt eine Resultierende null (Fig. 23 und 25). Schickt man daher (Fig. 26) durch drei Leitungen drei gleich starke Wechselströme a_1, a_2, a_3 mit je 120° Phasenunterschied (Drehstrom), und legt die Leitungen am Ende zusammen, so kann man eine Rückleitung sparen, da

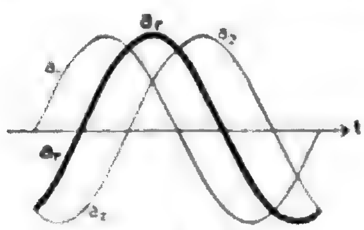


Fig. 24.

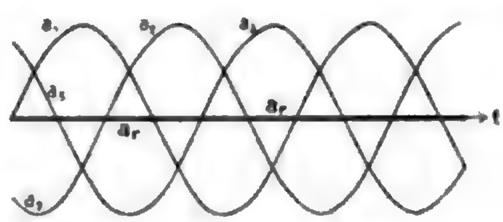


Fig. 25.

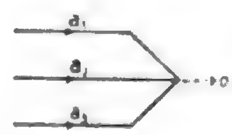


Fig. 26.

sich die drei Ströme dauernd zu null ergänzen. Man sieht, daß bei der Zusammensetzung mehrerer Schwingungen der Phasenunterschied eine wichtige Rolle spielt.

2b) Ungleiche Frequenzen. Sind die Frequenzen der sich überlagernden Schwingungen nicht gleich, so ist die resultierende Schwingung nicht mehr sinusförmig. Stehen sie aber in ganzzahligem Verhältnis zueinander, so bleibt die reine Periodizität der resultierenden Schwingung gewahrt. Ueberlagern sich z. B. Schwingungen von 2 und 3 Sekunden Schwingungsdauer (Fig. 27), so sind beide Einzelschwingungen nach je 6 Sekunden immer wieder in demselben Bewegungszustand, nach 2 oder 3 Sekunden würde es nur die eine oder die andere sein. Durch solche Ueberlagerungen können alle möglichen mehr oder weniger komplizierten Schwingungsformen entstehen, da man sich ja umgekehrt nach dem Fourierschen Theorem jede beliebige periodische Bewegung als aus sich überlagernden Sinusschwingungen entstanden denken kann. Stehen die Frequenzen der sich überlagernden Schwingungen in keinem ganzzahligen Verhältnis, so ist eine reine Periodizität der resultierenden Bewegung nicht mehr vorhanden, denn immer wenn die eine Schwingung eine volle Periode durchlaufen hat, wird sich die andere nicht in dem ursprünglichen Schwingungszustand befinden, so daß auch der weitere Verlauf der resultierenden Bewegung nicht der gleiche ist.

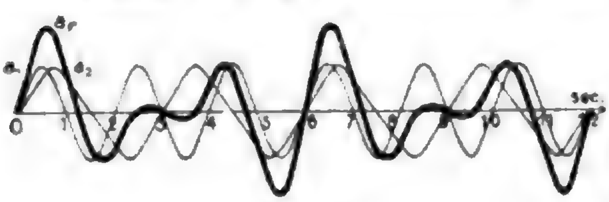


Fig. 27.

Besonderes Interesse verdient noch das

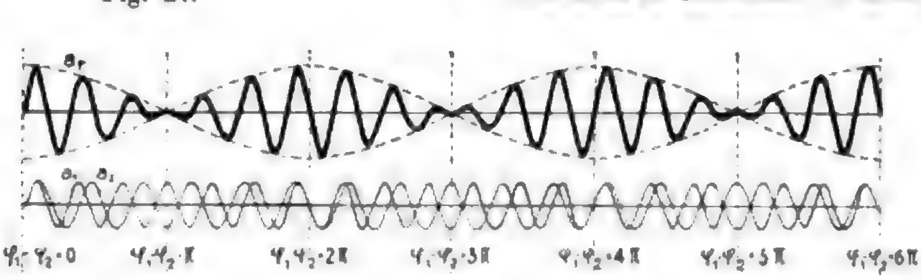


Fig. 28.

Phänomen der Schwebungen (Fig. 28). Diese treten ein, wenn die beiden sich überlagernden Schwingungen sehr nahe die gleiche Periodenzahl haben. Sind zwei solche Schwingungen anfangs in Phase, so ist die resultierende Schwingung in diesem Moment einfach die algebraische Summe beider, beide verstärken sich also. Allmählich wird dann die langsamere Schwingung immer mehr hinter der schnelleren zurückbleiben. Nach einer gewissen Zeit ist der Phasenunterschied $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi = 180^\circ$ geworden, die beiden Schwingungen schwingen entgegengesetzt, schwächen sich und heben sich gegenseitig ganz auf, wenn sie wie in Fig. 28 gezeichnet, gleiche Amplitude haben. Im weiteren Verlauf wird der Phasenunterschied noch größer. Da aber ein Phasenunterschied von $2\pi = 360^\circ$ gleichwertig der Phasengleichheit ist, tritt dann wieder eine Verstärkung ein. Die resultierende Schwingung ist also eine Schwingung von etwa der gleichen Periode aber wechselnder Amplitude. Dies läßt sich auch durch Formeln nachweisen. Es seien die Amplituden der beiden Schwingungen gleich groß, dann ist $a_1 = A \sin \omega_1 t$; $a_2 = A \sin \omega_2 t$ und nach einer bekannten trigonometrischen Formel $a_r = a_1 + a_2 = 2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t\right)$. Dieser Ausdruck läßt sich auslegen als eine Sinusschwingung der mittleren Periode $\omega_m = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ und der Amplitude $2A \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) t$, d. h. einer Amplitude, die selbst sich mit der Zeit sinusförmig ändert, bald 2A, bald null beträgt. Diese Auslegung hat freilich nur einen Sinn, wenn die Aenderung der Amplitude langsam im Vergleich zur eigentlichen Schwingung vor sich geht, so daß die momentane Amplitude durch mehrere nahezu gleich große maximale Ausschläge gekennzeichnet ist. Das ist aber der Fall wenn $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$ klein gegen $\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ ist, also ω_1 und ω_2 nahezu gleich sind. Nur dann wird man von eigentlichen Schwebungen reden können. In Figur 28 ist $\omega_1 = \frac{13}{11} \omega_2$. Die Schwebungen treten deutlich hervor. In Figur 27, wo $\omega_1 = \frac{3}{2} \omega_2$ war, ist dies schon nicht mehr der Fall.

Solche Schwebungen treten in der Akustik vielfach auf, z. B. wenn zwei ein wenig verstimmte Stimmgabeln gleichzeitig erklingen; man hört dann ein periodisches Anschwellen und Abnehmen der Lautstärke. Sie bilden eins der wichtigsten Hilfsmittel, um die Schwingungszahlen zweier Stimmgabeln genau miteinander zu vergleichen. Die Anzahl der Schwebungen in der Sekunde ist direkt die Differenz der Schwingungszahlen. Mit der in Figur 29 dargestellten Vorrichtung lassen sich die Schwebungen auch graphisch fixieren. Auf diese Weise sind die in Figur 30 gezeichneten Kurven erhalten.

Zu Figur 29. Die linke Stimmgabel ist fest eingespannt und trägt auf einer ihrer Zinken eine berußte Glasplatte g. Die rechte Stimmgabel läßt sich mittels Schlittenführung d von links nach rechts verschieben. An einer ihrer Zinken ist ein kleiner Stift befestigt, der die Glasplatte g berührt und bei Bewegung in die Rußschicht einen feinen Strich einkratzt. Der Ausschlag, die relative Bewegung zwischen Stift und Platte von vorne nach hinten ist dann gleich der Differenz der einzelnen Absolutbewegungen. Die der Zeit proportionale Bewegung wird durch Verschieben der rechten Stimmgabel von links nach rechts hergestellt.

2c) Ungleiche Richtungen. Zum Schluß sei noch der Fall untersucht, daß zwei nicht in derselben Richtung schwingende Bewegungen sich überlagern.

Es ist dann nicht mehr möglich den zeitlichen Verlauf der Schwingung durch eine Kurve darzustellen, da es nicht mehr allein auf die Größe, sondern auch auf die Richtung des Ausschlags ankommt. Man kann aber statt dessen die Bahnkurve des schwingenden Punktes zeichnen, den Weg, den der schwingende Punkt durch gleichzeitige Bewegung in der X- und Y-Richtung beschreibt. Mit welcher Geschwindigkeit der Punkt diese Kurve durchläuft, läßt sich dann freilich aus der Zeichnung nicht mehr ersehen. Rechnerisch erhält man die Bahnkurve, also die Beziehung zwischen dem Ausschlage x in der einen und y in der anderen Richtung, indem man aus den Glei-



Fig. 29.

chungen $x = f_1(t)$, und $y = f_2(t)$ die Zeit t eliminiert.

Es sei vorausgesetzt, daß die Schwingungen sinusförmig und in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen verlaufen, so daß die Bahnkurve durch die beiden Gleichungen $x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$ und $y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$ gegeben ist und x und y die rechtwinkligen Koordinaten der Bahnkurve sind. Da die äußersten Werte der Sinusfunktion ± 1 sind, so folgt zunächst, daß die Bahnkurve innerhalb eines Rechteckes liegen muß, das durch die Linien $x = +A_1$, $x = -A_1$ und $y = +A_2$, $y = -A_2$ gebildet wird (Fig. 31). Jedesmal, wenn $\omega_1 t - \varphi_1 = k\frac{\pi}{2}$ wird, wobei k eine beliebige ungerade Zahl ist, wird $x = \pm A_1$, d. h. die Bahnkurve berührt eine der senkrechten Seiten des Rechtecks. Ebenso berührt sie eine der wagrechten Seiten, wenn $\omega_2 t - \varphi_2 = k\frac{\pi}{2}$ wird.

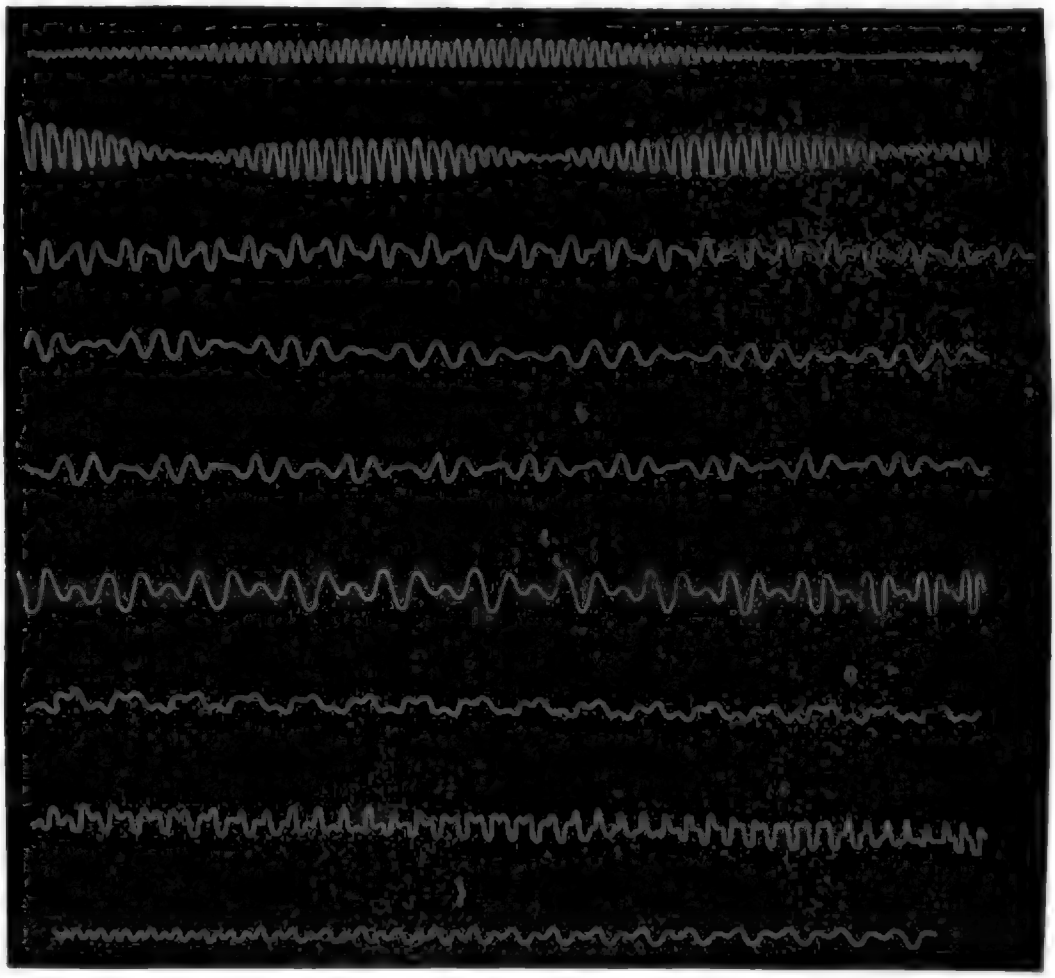


Fig. 30.

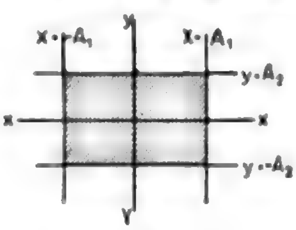


Fig. 31.

Für den Fall gleicher Frequenzen, $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ erhält man nach einiger Rechenarbeit für die Bahnkurve die Gleichung

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - \sin^2(\varphi_1 - \varphi_2) = 0.$$

Das ist eine quadratische Gleichung, die einen Kegelschnitt, und zwar stets eine Ellipse darstellt (Fig. 32). Für $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ geht sie über in $\left(\frac{x}{A_1} - \frac{y}{A_2}\right)^2 = 0$, d. h. die Ellipse wird zu einer geraden Linie $y = \frac{A_2}{A_1} x$, die die X-Achse unter dem Winkel $\operatorname{tg} \alpha = \frac{A_2}{A_1}$ schneidet (Fig. 33). Dies Resultat hätten wir auch ohne weiteres aus dem Ansatz $x = A_1 \sin(\omega t - \varphi)$; $y = A_2 \sin(\omega t - \varphi)$ gewinnen können. Die resultierende Schwingung ist wieder eine einfache sinusförmige Schwingung, nur in anderer Richtung.

Daraus folgt umgekehrt, daß man eine sinusförmige Schwingung stets durch zwei gleichphasige Schwingungen in zwei zu-

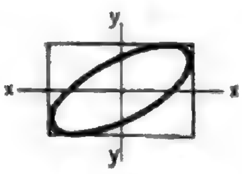


Fig. 32.

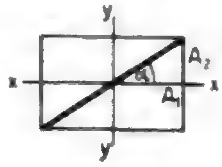


Fig. 33.

einander senkrechten Richtungen ersetzen kann.

Für $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi$ geht die Gleichung über in $\left(\frac{x}{A_1} + \frac{y}{A_2}\right)^2 = 0$ oder $y = -\frac{A_2}{A_1}x$. Wir erhalten die andere Diagonale des Berührungsrechtecks (Fig. 34). Da in beiden Fällen beide Schwingungen zu gleicher Zeit ihren extremen Ausschlag erreichen, werden beide Seiten des Berührungsrechtecks gleichzeitig berührt. Das aber ist nur in der Ecke möglich. Bei allen anderen Phasenunterschieden findet dagegen die Berührung nicht gleichzeitig statt (Fig. 32). Speziell für $\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ erreicht die eine Schwingung gerade ihren Maximalwert, wenn die andere null ist; die Berührungspunkte liegen auf den Achsen,

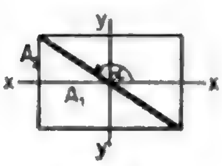


Fig. 34.

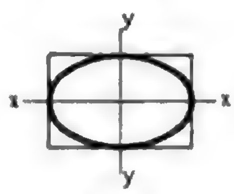


Fig. 35.

die Ellipse liegt in der Hauptlage (Fig. 35), die Bahnkurve wird $\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - 1 = 0$. Wird dazu noch $A_1 = A_2 = A$, so erhalten wir einen Kreis als Bahnkurve (Fig. 36). Die einzelnen Schwingungen lassen sich dann schreiben $x = A \cos(\omega t - \varphi)$; $y = A \sin(\omega t - \varphi)$, ein Fall, von dem wir ursprünglich bei der Herleitung der Sinusfunktion aus der gleichförmigen Kreisbewegung ausgegangen waren.

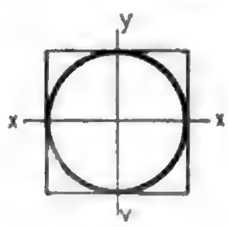


Fig. 36.

Diese Zusammensetzung spielt bei den elektrischen Wechselstrommotoren eine wichtige Rolle, indem sich hier zwei ihrer Stärke nach periodisch wechselnde Magnetfelder in zwei zueinander senkrechten Richtungen zu einem resultierenden Magnetfelde von konstanter Größe aber sich gleichförmig drehender Richtung, dem sogenannten Drehfelde zusammensetzen. Die beiden Wechselfelder müssen dabei eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$ gegeneinander haben, wenn die Drehung im Uhrzeigersinne, und von $-\frac{\pi}{2} = -90^\circ$, wenn sie im entgegengesetzten Sinne erfolgen soll. Ganz allgemein gilt nämlich das Gesetz, daß man stets dieselbe Bahnkurve, nur in entgegengesetzter Richtung durchlaufen, erhält, wenn die Phasenverschiebung einen gleich großen aber negativen Wert hat.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet dieser Schwingungen in zwei Richtungen ist die Optik. Man nennt einen Lichtstrahl, dessen elektrisches Feld entsprechend Figur 33 oder 34 nur in einer Richtung schwingt, linear polarisiert. Nun kann man durch Einschalten von doppelbrechenden Kristallen die Phase einer Schwingung beliebig gegen die einer anderen dazu senkrechten verzögern und erhält dadurch einen elliptisch oder im speziellen Fall zirkular polarisierten Strahl, entsprechend den Figuren 32, 35 oder 36. Im letzteren Falle schwingt das elektrische Feld genau wie das schon oben besprochene magnetische Drehfeld. Umgekehrt kann man auch irgendeinen elliptisch oder zirkular polarisierten Strahl durch entsprechende Phasenverschiebung in einen linear polarisierten umwandeln. Da man die Polarisationsebene des letzteren durch ein Nicolsches Prisma leicht feststellen kann, bildet diese Methode eines der wichtigsten Hilfsmittel zur Untersuchung von Lichtstrahlen.

Alle diese Bahnkurven lassen sich mit einem Fadenpendel leicht herstellen, das ja in zwei zueinander senkrechten Richtungen sinusförmige Schwingungen von gleicher Frequenz ausführen kann. Ein Luftkegelspiel ist besonders geeignet dazu. Läßt man die Kugel aus einer abgelenkten Stelle vorsichtig los, so schwingt sie nur in einer Richtung hin und her; gibt man ihr aber beim Loslassen seitwärts einen Stoß, so beschreibt sie eine elliptische Bahn und wenn der Stoß seitwärts eine bestimmte Stärke hat, rotiert die Kugel im Kreise herum. Befestigt man an der Kugel ein mit Streusand gefülltes Gefäß mit einem Loch, so zeichnet der Streusand auf dem Boden eine der den Figuren 32 bis 36 entsprechende Bahnkurve auf. Bei der elliptischen Schwingung bleibt die Bahn übrigens nur bei kleinen Ausschlägen in ihrer Lage erhalten; bei großen Ausschlägen dreht sich die Ellipse, wie in Figur 37 gezeichnet, allmählich herum. Das kommt daher, daß die Pendelschwingungen bei großen Ausschlägen nicht mehr sinusförmig sind und dann die Schwingung in der einen Richtung die in der anderen beeinflußt.

Noch deutlicher, weil man die ganze Bahnkurve auf einmal vor Augen sieht, ist folgender

Versuch. An einem runden, gut federnden Stab oder Draht D (Fig. 38), z. B. einer Stricknadel, ist eine kleine möglichst glänzende Kugel K an-



Fig. 37.



Fig. 38.

gebracht. Das andere Ende des Drahtes ist fest, etwa in einen Schraubstock S eingespannt. Die Kugel wird stark beleuchtet, so daß sie einen scharfen Lichtpunkt als Reflex ergibt. Stößt man jetzt die Kugel geeignet an, so beschreibt sie elliptische Bahnen, indem sie in zwei zueinander senkrechten Richtungen Schwingungen gleicher Frequenz ausführt. Sind diese Schwingungen so schnell, daß der Lichteindruck im Auge während einer Schwingung nicht verschwindet, so sieht man den Lichtpunkt auf der Kugel als leuchtende Bahnkurve ausgezogen erscheinen. Sind die Frequenzen der zueinander senkrechten Schwingungen nicht absolut gleich, was wegen geringer Unsymmetrien meist der Fall ist, so ändert sich wie bei den Schwebungen die Phasendifferenz zwischen den Schwingungen allmählich; die elliptische leuchtende Linie deformiert sich langsam, geht aus der Hauptlage in eine schiefe Lage, in eine gerade Linie und wieder in die ursprüngliche Bahn usw. über, beschreibt also nacheinander alle Bahnkurven, die durch verschiedene Phasenunterschiede der zwei Schwingungen entstehen können. Durch die Dämpfung der Schwingungen zieht sich die Bahnkurve allmählich auf einen Punkt zusammen.

Weniger durch ihr physikalisches Interesse als ihres hübschen Aussehens wegen sind die Bahnkurven bemerkenswert, die man erhält, wenn die Frequenzen der beiden zueinander senkrechten Schwingungen nicht gleich, aber im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen, etwa 1 : 2, 2 : 3, 3 : 4, zueinander stehen. Man erhält dann eigentümlich durcheinander verschlungene Figuren (Fig. 39), die nach dem Forscher Lissajous benannt werden, der sich zuerst und am ausführlichsten mit ihnen befaßt hat.

Auch diese Bahnkurven lassen sich leicht experimentell herstellen, z. B. durch das in Figur 40 gezeichnete Doppelpendel. Sind die

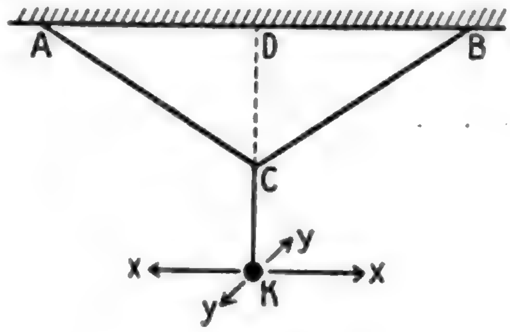


Fig. 40.

Fäden AC und BC genügend flach gespannt, so schwingt die Kugel K in der X — X-Richtung um den Punkt C. In der dazu senkrechten Y-Y-Richtung dreht sie sich dagegen um die Punkte A und B, verhält sich also wie ein in D aufgehängtes Pendel. Ist KD viermal so lang wie KC, so verhalten sich die Frequenzen wie 1:2, da die Pendelschwingungen sich wie die Quadratwurzeln aus den Pendelängen verhalten. Durch Streusand kann man auch hier die Bahnkurve aufzeichnen lassen.

Auch die andere Methode mit der beleuchteten Kugel kann man verwenden, wenn man statt des runden federnden Drahtes D in Figur 38 einen solchen von rechteckigem Querschnitt (Fig. 41) verwendet. In der Längsrichtung X—X ist ein solcher Stab viel steifer, die elastische Kraft viel größer, als in der Querrichtung Y—Y;

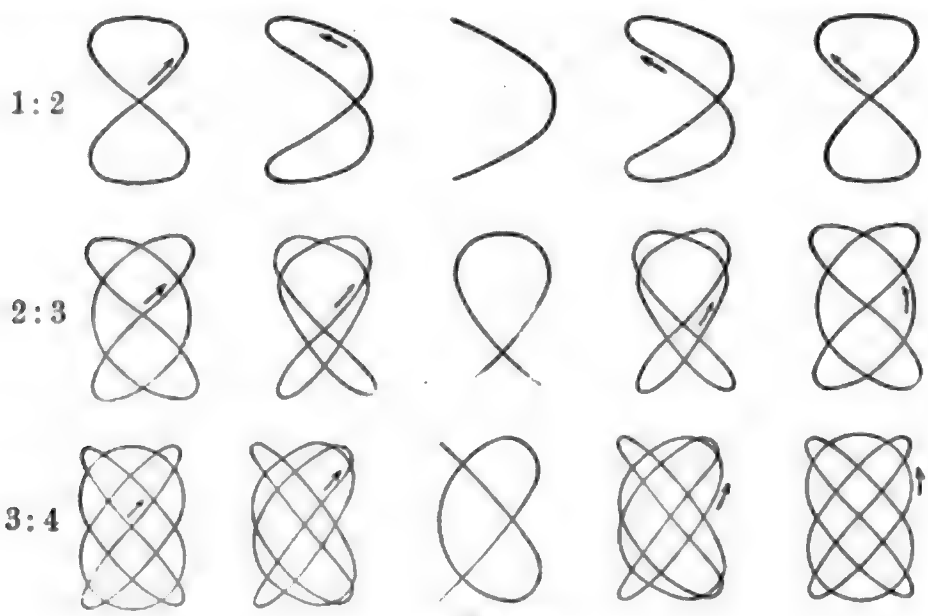


Fig. 39.

daher wird die Schwingungsdauer in beiden Richtungen um so mehr voneinander abweichen, je größer der Unterschied der Kantenlängen des Querschnittsrechtecks ist. Es ist aber nicht ganz leicht zu treffen, daß die Frequenzen in den beiden Richtungen sich ganz genau wie 1:2 oder dergleichen verhalten, und man muß durch Abfeilen etwas mühsam nachhelfen. Setzt man dagegen zwei ganz flache Stäbe, wie in Figur 42

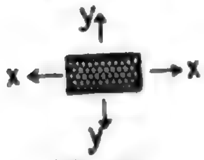


Fig. 41.



Fig. 42.

perspektivisch angedeutet, aneinander, so schwingt jeder Stab im wesentlichen nur in seiner Querrichtung und man kann die eine Frequenz durch längeres oder kürzeres Einspannen der unteren Feder bequem verändern. Man erhält auch hier bei genügend schnellen Schwingungen die Bahnkurve, d. h. die verschiedenen Lissajousschen Figuren als leuchtende Linien, die sich bei nicht absolut gleichen Frequenzen entsprechend der Phasenänderung allmählich deformieren.

Literatur. Winkelmann, *Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. II, Akustik von F. Auerbach, 1909, S. 1 bis 66 (enthält auch sehr ausführliche Literaturangaben).* — **Chwolson,** *Lehrbuch der Physik, Bd. I, 4. Kapitel: Die harmonische Schwingungsbewegung, S. 131 bis 159.* — **Rayleigh,** *Die Theorie des Schalles, übersetzt von F. Neesen, Braunschweig 1880, Bd. I, die ersten Kapitel.* — **F. Melde,** *Die Lehre von den Schwingungskurven, mit einem Atlas. Leipzig 1864.* — **Derselbe,** *Akustik. Leipzig 1883.* — **W. Thomson,** *Phil. Mag. (4),* 5, *393, 1855.* — **I. Lissajous,** *Ann. chim. phys. (3),* 51, *147, 1857 und zahlreiche kleinere Arbeiten, auch in den Comptes rendus seit 1855.* — **Barkhausen,** *Phys. Zeitschr.* 8, *624, 1907 (Funkendämpfung).*

H. Barkhausen.

Schwingende Systeme.

I. Austausch verschiedener Energiearten (mechanische, elektrische und sonstige Eigenschwingungen). II. Schwingungen mit einem Freiheitsgrade. 1. Allgemeines. 2. Beispiele (Pendel, Wage, Meßinstrumente, Kreisel usw., Kondensatorentladungen). III. Schwingungen mit zwei Freiheitsgraden, gekoppelte Systeme (Doppelpendel, Hauptschwingungen, Kopplung; Beispiele). IV. Schwingungen mit unendlich vielen Freiheitsgraden. 1. Uebergang zu immer mehr Freiheitsgraden. 2. Saitenschwingungen: a) Theorie der Hauptschwingungen. b) Theorie der stehenden Wellen. 3. Weitere mechanische Schwingungen: a) Allgemeines. b) Stäbe und Pfeifen, Stimmgabeln. c) Membranen und Platten, Glocken. d) Wasserwellen. 4. Elektrische Schwingungen: V. Die Schwingungsdauer der häufigsten Schwingungen. 1. Mechanische Schwingungen. 2. Elektrische Schwingungen.

I. Austausch verschiedener Energiearten.

Schwingende Systeme oder Systeme mit einer Eigenschwingung sind dadurch gekennzeichnet, daß sie, sich selbst überlassen, ihren Zustand dauernd ändern, aber in bestimmten Zwischenräumen immer wieder im wesentlichen ihren alten Zustand wiedererlangen, daß sie von selbst eine schwingende Bewegung in weiterem Sinne ausführen können. Nach dem Satz von der Erhaltung der Energie folgt, daß der Energievorrat solcher Systeme, den wir soweit er an dem Schwingungsvorgang beteiligt ist, als Schwingungsenergie bezeichnen wollen, immer gleich groß bleiben muß; sonst könnten sie nicht von selbst in ihren alten Zustand zurückkehren. Da sich aber, wie gesagt, der Zustand dauernd ändern soll, so kann die Aenderung nur in einem Austausch verschiedener Energiearten des Systems untereinander bestehen, bei dem die Gesamtenergie gleich groß bleibt. Das System muß also mindestens zwei verschiedene Arten von Energie besitzen, die sich umkehrbar ohne wesentliche Verluste ineinander umwandeln können.

Aus dieser Bedingung können wir umgekehrt ohne weiteres eine große Zahl von theoretisch möglichen Eigenschwingungen aufstellen, indem wir die verschiedenen bekannten Energiearten miteinander kombinieren; praktisch haben aber nur die folgenden beiden eine größere Bedeutung:

1. Rein mechanische Eigenschwingungen. Austausch kinetischer und potentieller Energie, und zwar letztere a) aus der Schwerkraft (Pendel), b) aus elastischen Kräften stammend (Saite).

2. Rein elektrische Eigenschwingungen. Austausch elektrostatischer und elektromagnetischer Energie (Stromkreis mit Kondensator und Magnetspule).

Nur bei diesen beiden kann sich nämlich praktisch der Energieaustausch ohne größeren Energieverlust vollziehen, so daß nach einem einmaligen Anstoße eine richtige Schwingung, d. h. ein häufiges Hin- und Herschwingen erfolgt. Auch sind bei allen mechanischen Bewegungsvorgängen stets elastische Kräfte und die Schwerkraft, ebenso beim elektrischen Strome stets magnetische und elektrostatische Kräfte vorhanden und da eine Umwandlung der Energien hier ohne weiteres möglich ist, so besitzt prinzipiell jedes mechanische und elektrische System die Möglichkeit von Eigenschwingungen.

Die übrigen Schwingungsarten lassen sich meistens auf die mechanischen oder elektrischen Eigenschwingungen zurückführen. Eine Magnet-

nadel in einem Kompaß kann z. B. Schwingungen um die Nord-Südrichtung ausführen. Es handelt sich dabei um eine mechanisch-elektrische Eigenschwingung. Wir können sie aber auch zu den rein mechanischen rechnen, da die magnetischen Kräfte, die die Nadel in ihre Ruhelage zu treiben suchen, sich mechanisch ganz analog verhalten wie elastische Kräfte oder die Schwerkraft beim Pendel. In gleicher Weise wirken elektrostatische Kräfte auf einen elektrisch geladenen Körper, der sich in einem elektrostatischen Felde befindet. — Bei den elastischen Schwingungen der Luft, z. B. in einer tönenden Pfeife, setzt sich ein Teil der kinetischen Energie in Wärmeenergie um, da sich die Luft beim Zusammendrücken erwärmt. Man behandelt aber auch diese Schwingungen wie rein mechanische, indem man die Wärmeentwickelung als eine erhöhte Elastizität der Luft in Rechnung setzt. Die vorzunehmende Erhöhung ist nicht unbeträchtlich, sie beträgt über 40%.

Auf rein elektrische Eigenschwingungen lassen sich z. B. die chemisch-elektrischen Schwingungen zurückführen, bei denen die chemische Energie einer Polarisationszelle die elektrostatische Energie eines elektrischen Kondensators vertritt. Eine solche Zelle kann nämlich die magnetische Energie eines Stromes aufnehmen und, wenn sie verbraucht ist, umgekehrt wieder einen Strom, d. h. magnetische Energie hervorrufen. Die Polarisationszellen wurden früher in der Technik geradezu als elektrische Kondensatoren benutzt. Die Eigenschwingungen sind hier auch experimentell untersucht worden.[1]) — Prinzipiell könnte auch eine Thermosäule, also Wärmeenergie statt chemischer Energie, dasselbe leisten. Der Strom erzeugt gemäß dem Peltier-Effekt einen Wärmeunterschied der Lötstellen; dieser Wärmeunterschied erzeugt als Thermokraft umgekehrt wieder einen Strom in entgegengesetzter Richtung, sobald der Primärstrom Null geworden. Der Versuch ist noch nicht ausgeführt worden.

Auch eine Dynamomaschine kann wie ein elektrischer Kondensator wirken. Wird sie zunächst vom Strom angetrieben, so läuft sie als Motor und speichert kinetische Energie in sich auf. Wird der Strom dann Null, so läuft die Maschine als Generator, solange ihr Schwung reicht, und erzeugt während dieser Zeit einen Strom entgegengesetzter Richtung, der wiederum die Maschine, wenn sie zur Ruhe gekommen ist, als Motor in entgegengesetzte Rotation versetzt usw. Dieser Versuch ist auch experimentell verwirklicht worden.[2]) Man kann ihn auch als mechanische Schwingung behandeln, bei der die magnetische Energie des Stromes die potentielle mechanische Energie vertritt.

Eine besondere Art der Eigenschwingung, die man gewöhnlich gar nicht dazu rechnet, ist die Rotation. Die Rotationsbewegung kann in zwei gleiche zueinander senkrechte Schwingungsbewegungen zerlegt werden, die in der Phase um $^1/_4$ Periode gegeneinander verschoben sind. Dies läßt sich leicht an einem Fadenpendel erläutern, das sowohl von vorn nach hinten als auch von links nach rechts schwingen kann. Wenn das Pendel zunächst nur in der ersten Richtung AB (Fig. 1) schwingt und wir ihm gerade im Umkehrpunkte A oder B einen seitlichen Stoß von bestimmter Stärke erteilen, so ist die resultierende Bewegung eine Rotation um den Schwingungsmittelpunkt O. Das Pendel setzt nämlich einerseits seine Schwingungsbewegung AB fort, die durch den senkrecht dazu erfolgten Stoß nicht beeinflußt wird, macht aber andererseits gleichzeitig eine Schwingung in der dazu senkrechten Richtung (CO), die um $^1/_4$ Periode verschoben ist, da sie im Punkte A wo die Geschwindigkeit der Schwingung AB gerade Null ist, ihre größte Geschwindigkeit hat.

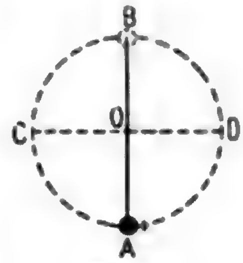


Fig. 1.

Das Eigentümliche der Rotation besteht darin, daß während des ganzen Verlaufes die kinetische und die potentielle Energie einzeln konstant bleiben. Die rücktreibende Zentralkraft tritt gar nicht in Wirksamkeit, da die Bewegung stets senkrecht zu ihr erfolgt. Sie hebt nur die Zentrifugalkraft auf. Die kinetische Energie der einen Schwingung wandelt sich daher einfach in die kinetische Energie der anderen Schwingung um, die gesamte kinetische Energie bleibt dauernd konstant.

II. Schwingungen mit einem Freiheitsgrade.

1. Allgemeines. Unter den schwingenden Systemen zeichnen sich solche durch besondere Einfachheit aus, die, wie man sagt, nur einen Freiheitsgrad besitzen. Das bedeutet, daß sie, sich selbst überlassen, stets nur eine einzige ganz bestimmte Form einer Eigenschwingung ausführen können, die in den meisten Fällen sinusförmig ist, und daß zur Kennzeichnung ihres Schwingungszustandes eine einzige Größe, der Ausschlag im weiteren Sinne ausreicht. Das ist z. B. beim Uhrpendel und auch bei den elektrischen Schwingungen geschlossener Kondensatorkreise der Fall. Bei letzteren entspricht dem Ausschlage die sich mit der Zeit in ganz bestimmter Weise ändernde Elektrizitätsmenge im Kondensator. Demgegenüber kann z. B. eine schwingende Saite eine große Zahl von verschiedenen Schwingungsformen annehmen, auch genügt es nicht, nur einen einzigen Punkt der Saite ins Auge zu fassen. Bei speziellen Schwingungsformen bleiben z. B. bestimmte Punkte der Saite vollkommen in Ruhe, während benachbarte Punkte zu beiden Seiten an der Schwingung teilnehmen. Vollkommen analog verhalten sich bei den elektrischen Schwingungen die sogenannten offenen Schwingungskreise, bei denen die stromführenden Drähte selbst sich aufladen und

[1]) F. Krüger, Phys. Zeitschr. 11, 719, 1910.

[2]) H. Busch, Stabilität, Labilität und Pendelungen in der Elektrotechnik, Leipzig 1912.

den Kondensator bilden. Auch hier sind unendlich viele verschiedene Schwingungszustände möglich und auch hier muß man die Ladung in jedem Punkte der Strombahn beachten. Solche Systeme bezeichnet man als mit unendlich vielen Freiheitsgraden behaftet. Es gibt auch schwingende Systeme mit zwei, drei usw. Freiheitsgraden, die im allgemeinen aus einer Vereinigung von Systemen mit einem Freiheitsgrad bestehen. Zwei untereinander hängende oder sonstwie gekoppelte Schneidenpendel bilden z. B. ein System mit zwei Freiheitsgraden.

Bei den mechanischen Schwingungen mit einem Freiheitsgrade handelt es sich immer um eine Schwingungsmasse, die durch eine aus der potentiellen Energie entspringende Zentralkraft nach einer bestimmten Lage, der Ruhelage, getrieben wird, aber vermöge ihrer kinetischen Energie über diese Ruhelage hinausschießt, um dann abermals zurückgetrieben zu werden. Bleibt die Schwingungsmasse während der Schwingung unverändert, und nimmt die Zentralkraft proportional der Entfernung aus der Ruhelage zu, so ist die Schwingung sinusförmig, sonst ist der Verlauf ein anderer. Die Schwingungsdauer $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{M}{D}}$ ist um so größer, je größer die Schwingungsmasse M und je kleiner die rücktreibende Kraft D ist (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegung").

2. **Beispiele.** Beim Pendel (s. den Artikel „Pendel") treffen die Sinusbedingungen nur bei kleinen Ausschlägen zu, bei Ausschlägen über 90°, also wenn sich das Pendel nahezu auf den Kopf stellt, nimmt die rücktreibende Kraft sogar mit wachsendem Ausschlage wieder ab. Die Schwingungen verlaufen dann durchaus nicht mehr sinusförmig, auch wird die Schwingung wegen der geringeren rücktreibenden Kraft langsamer.

Die gewöhnliche Wage ist nichts anderes als ein Pendel, d. h. ein um eine Achse drehbarer, der Schwerkraft unterworfener, mehr oder weniger komplizierter Körper. Die Empfindlichkeit, d. h. die Aenderung der Ruhelage bei einer kleinen Belastung, ist natürlich um so größer, je kleiner die sich der Aenderung widersetzende rücktreibende Kraft ist. Eine kleine Kraft bedingt aber große Schwingungsdauer, so daß bei hochempfindlichen Wagen die Schwingungsdauer 10 und mehr Sekunden beträgt, was im Interesse einer schnellen Ablesung sehr unvorteilhaft, aber nicht zu vermeiden ist. Bei Federwagen kommt zur Schwerkraft noch die Kraft einer elastischen Feder, wodurch aber weiter nichts geändert wird. Alle Wagen zeigen um so genauer, je weniger gedämpft sie schwingen, da die Dämpfungsursache die von selbst vorhandene mechanische Reibung ist, die auch eine Verstellung der Ruhelage hervorruft. Von dem Anbringen einer besonderen reibungslosen Dämpfung sieht man ab, da man gröbere Wagen leicht mit der Hand dämpfen kann, Präzisionswagen aber stets im schwingenden Zustande abliest, eben wegen der nie ganz zu vermeidenden Reibungsdämpfung.

Als weitere Spezialisierung der Wage lassen sich eine große Zahl von Meßinstrumenten, insbesondere die elektrischen auffassen, indem auch bei ihnen ein Zeiger durch Feder- oder Schwerkraft in eine bestimmte Nulllage zurückgetrieben und aus dieser durch die zu messende Kraft abgelenkt wird. Der dauernde Ausschlag entspricht einer bestimmten Größe der zu messenden Kraft und diese wieder einer bestimmten elektrischen Stromstärke oder dgl. Für diese Meßinstrumente gelten daher auch dieselben Beziehungen wie für die Wage, besonders auch, daß mit wachsender Empfindlichkeit die Schwingungsdauer zunehmen muß. Um sie zu verringern, macht man die schwingende Masse so klein als möglich, was auch die Unempfindlichkeit gegen Stöße erhöht. Als rücktreibende Kraft verwendet man bei den empfindlichsten Instrumenten die Torsionskraft langer Kokon- oder feinster Quarz- oder Metallfäden. Diese winzige Kraft braucht dann oft 10 und mehr Sekunden, um das bewegte System trotz seiner geringen Masse hin und her zu treiben. Da man bei den Meßinstrumenten in der Ruhelage abliest und die Schwingungen mit der Hand nicht dämpfen kann, werden meist künstliche, reibungslose Dämpfungen eingebaut (Luft- oder elektromagnetische Dämpfungen; vgl. den Artikel „Schwingende Bewegungen"). Diese unterdrücken die Eigenschwingung meist ganz, bewirken also eine sofortige Einstellung in die Ruhelage, ohne diese selbst zu beeinflussen.

Der Kreisel ist in der üblichen Anordnung ein auf dem Kopf stehendes Pendel, indem der Schwerpunkt höher als der Unterstützungspunkt liegt. Bei ihm ruft jede auf die Achse wirkende Kraft eine zu ihr senkrechte Bewegung hervor. Daher fällt der Kreisel nicht um, sondern macht eigentümliche nickende Bewegungen, wenn man ihn anstößt.

Andere leicht verständliche Beispiele für mechanische Eigenschwingungen sind: der Klöppel bei elektrischen Klingeln, die Schaukel, das Hin- und Herbiegen der Bäume im Winde, das auch bei Gebäuden nur in viel geringerem Maße auftritt und selbst bei hohen Türmen nur wenige Millimeter ausmacht, die Zungen der Frequenz-

messer, die durch ihren Resonanzausschlag die Uebereinstimmung ihrer Eigenfrequenz mit der zu messenden anzeigen, die Schwingungen von Maschinenwellen und zwar einerseits Biegungs-, andererseits Torsionsschwingungen, die im Resonanzfalle zum Bruche führen können, die Schwingungen der Flüssigkeit in Barometer-, Wasserstands- oder U-förmig gebogenen Röhren (Fig. 2), die Schwingungen schwimmender Körper, z. B. von Schiffen und zwar einerseits Tauchschwingungen auf- und abwärts, andererseits rollende Schwingungen, Neigungen nach der Seite, die bei Resonanz mit den Wellen das Umkippen eines Schiffes bewirken können, und die sich durch Schlingerkiele dämpfen lassen.

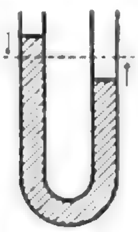


Fig. 2.

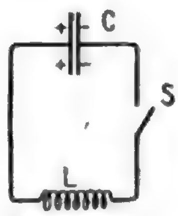


Fig. 3.

Elektrische Eigenschwingungen (s. den folgenden Artikel „Schwingungen, elektrische") besitzt jedes Stromsystem, das einen Kondensator enthält. Sie bestehen im einfachsten Falle darin, daß ein geladener Kondensator C (Fig. 3) beim Schließen des Schlüssels S einen immer stärker anwachsenden Strom durch die Magnetspule L treibt, bis er seine Ladung abgegeben hat, ein Moment, in dem der Strom seinen größten Wert hat und sich die ganze Energie des Kondensators C in magnetische Energie der Spule L umgesetzt hat. Der Strom in L kann dann wegen der magnetischen Trägheit, der Selbstinduktion, nicht plötzlich aufhören, sondern fließt weiter und ladet dadurch den Kondensator in entgegengesetztem Sinne immer höher auf. Die dadurch im Kondensator auftretende Spannung wirkt aber dem Strom entgegen, so daß dieser bald Null wird, während der Kondensator, abgesehen von der Dämpfung bis zu seiner ursprünglichen Höhe aufgeladen ist, ein Moment, in dem sich die magnetische Energie wieder in die Kondensatorenergie zurückverwandelt hat, also der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt ist. Sind die Kapazität C des Kondensators und die Selbstinduktion L der Magnetspule unveränderliche Größen, so verläuft auch hier die Schwingung genau sinusförmig und nach denselben Gesetzen wie die mechanischen Schwingungen (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegungen"). Die Schwingungsdauer bestimmt sich durch die Thomsonsche Formel $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$, ist also um so kleiner, je kleiner Selbstinduktion L und Kapazität C sind.

Kondensatoren werden technisch zur Funkendämpfung z. B. bei Induktorien und in der Telephonie verwandt. Es treten hier oft unbeabsichtigt Eigenschwingungen auf, die aber meist nicht stören. Umgekehrt werden die Eigenschwingungen von Kondensatorkreisen in der drahtlosen Telegraphie dazu benutzt, um die erforderlichen sehr schnell wechselnden Hochfrequenzströme zu erzeugen. Die ganze drahtlose Telegraphie beruht zum großen Teil auf einer geschickten Anwendung elektrischer Eigenschwingungen. Durch Verkleinern der Kapazität und Selbstinduktion erreicht man hier Schwingungsdauern von einer milliontel Sekunde und weniger.

III. Schwingungen mit zwei Freiheitsgraden (gekoppelte Systeme).

Ein triviales Beispiel ist ein aus zwei gewöhnlichen Pendeln bestehendes System. In einem solchen sind natürlich zweierlei Schwingungsbewegungen mit im allgemeinen verschiedenen Perioden möglich, indem jedes Pendel für sich in Schwingungen versetzt werden kann. Wenn wir jedoch die beiden Pendel durch eine dünne Spiralfeder F (Fig. 4) oder ein Gummiband miteinander

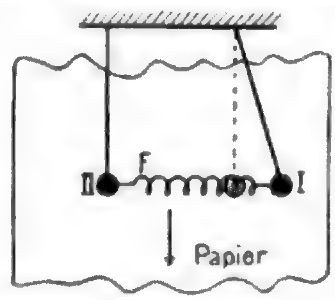


Fig. 4.

verbinden und jetzt das eine allein anstoßen, so übt es auf das zweite Pendel einen periodisch wechselnden Zug aus, so daß auch das zweite Pendel in Bewegung gerät. Ist dies aber eingetreten, so wird auch umgekehrt das zweite schwingende Pendel auf das erste einwirken. Die Theorie ergibt dann in Uebereinstimmung mit dem leicht anzustellenden interessanten Versuche, daß das zweite Pendel zunächst Schwingungsenergie von dem ersten aufnimmt, also in immer größere Schwingungen gerät, während das erste ein entsprechendes Maß Schwingungsenergie verliert, also weniger weit ausschlägt. Nach einiger Zeit bemerkt man aber, daß jetzt umgekehrt die Ausschläge des zweiten Pendels abnehmen, die des ersten wieder zunehmen, bis schließlich das zweite Pendel

wieder vollständig in Ruhe ist und das erste Pendel abgesehen von der Dämpfung seine ursprüngliche Schwingungsweite wiedererlangt hat. Die Schwingungsenergie ist wieder vom zweiten Pendel auf das erste zurückgewandert. Dasselbe Spiel setzt sich dann weiter so fort. Der Energiebetrag, der zwischen den zwei Pendeln ausgetauscht wird, ist um so größer, je mehr die Schwingungsdauer und die Gewichte der beiden Pendel übereinstimmen. Bei zwei vollständig gleichen Pendeln wandert die ganze, dem ersten Pendel mitgeteilte Energie auf das zweite Pendel über, so daß das zunächst angestoßene Pendel vollständig zur Ruhe kommt, während das andere stark schwingt. Nach einer bestimmten Zeit später schwingt wieder nur das erste Pendel, während das zweite in Ruhe ist usw. Denken wir uns in diesem Falle mit beiden Pendeln je einen Schreibstift verbunden, der auf einem dahinter von oben nach unten vorbeigezogenen Papier die jeweiligen Pendellagen markiert (vgl. Fig. 4), so erhalten wir den zeitlichen Verlauf der Schwingungen aufgezeichnet, wie er in Figur 5 dargestellt ist, in der nur

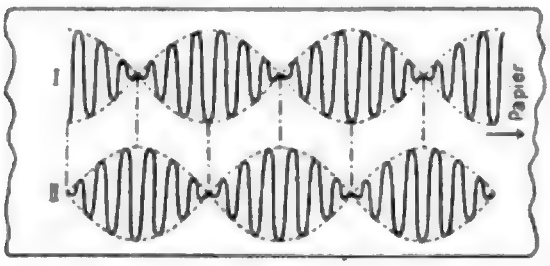


Fig. 5.

das Papier nachher um 90° gedreht ist. Es sieht genau so aus, als ob Schwebungen vorhanden wären, d. h. als ob jedes Pendel gleichzeitig zwei Schwingungen von nahezu gleicher Periode ausführte, die sich zu der resultierenden Schwingung mit Schwebungen zusammensetzten. Diese Auffassung ist, wie die genaue Theorie zeigt, tatsächlich richtig. Sie ist deshalb von Bedeutung, weil sich weiter nachweisen läßt, daß die *meisten Systeme mit zwei Freiheitsgraden zwei sogenannte Hauptschwingungen besitzen, die in verschiedener Stärke und Phase miteinander kombiniert alle überhaupt möglichen Schwingungszustände des Systems ergeben.* Der oben geschilderte vollkommene Uebergang der Schwingungsenergie von einem Pendel zum anderen ist nämlich durchaus nicht die einzige Schwingungsform und er wird nur erhalten, wenn zu Anfang das eine Pendel ganz in Ruhe und nur das andere abgelenkt und ruhig losgelassen wird. Lenkt man z. B. beide Pendel nach derselben Seite gleich weit ab (Fig. 6) und läßt sie gleichzeitig los, so schwingen sie genau im Takte gleichzeitig nach links und rechts, ohne daß eine Wanderung der Energie von einem Pendel auf das andere stattfände. Die verbindende Feder tritt gar nicht in Wirksamkeit. Man hat in diesem Falle nur die eine Hauptschwingung erregt, die Amplitude der anderen ist Null,

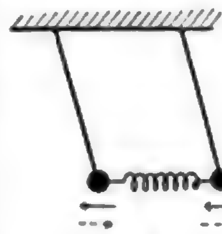


Fig. 6.

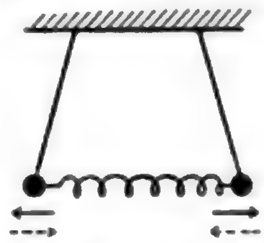


Fig. 7.

so daß keinerlei Schwebungserscheinungen auftreten. Die andere Hauptschwingung kann man auch für sich allein erregen, wenn man beide Pendel gleich weit, aber in entgegengesetzter Richtung aushebt (Fig. 7) und gleichzeitig losläßt. Sie schwingen dann immer in entgegengesetzter Phase weiter ohne irgendwelche Schwebungserscheinungen. Die verbindende Feder unterstützt in diesem Falle die rücktreibende Schwerkraft, so daß die Pendel stärker beschleunigt werden, die Schwingungsdauer dieser Hauptschwingung also kürzer wird als bei der in Figur 6 gezeichneten. Bei jeder anderen Art des Anstoßes werden diese beiden Hauptschwingungen gleichzeitig mehr oder weniger stark erregt und man kann den Schwingungsverlauf so auffassen, als ob jedes Pendel für sich allein da wäre und gleichzeitig beide Hauptschwingungen ausführte. Die resultierende Schwingung besteht dann nur bei nahezu gleicher Periode und gleich starker Erregung der beiden Hauptschwingungen in ausgesprochenen Schwebungserscheinungen.

Die verbindende Feder bezeichnet man als die *Kopplung* und nennt die Pendel ein gekoppeltes System. Ein Maß für die Kopplung, die man als fest oder lose bezeichnet, bildet in diesem Falle die Stärke der Feder. Je fester die Kopplung, desto mehr weichen bei zwei gleichen Pendeln die beiden Hauptschwingungen in ihrer Frequenz voneinander ab, desto schneller sind also die Schwebungen und der Energieaustausch. Bei sehr fester Kopplung lassen sich daher die Schwebungen nicht mehr gut unterscheiden. Die Kopplung, d. h. irgendeine Beeinflussung des einen Pendels durch das andere, kann auf sehr verschiedene Weise hergestellt werden; z. B. genügt es, wenn beide Pendel an demselben Balken hängen und dieser Balken sich bei den Schwingungen

kaum merklich mitbewegt, ein Fall, der bei zwei gleichen, nebeneinander hängenden Uhren ein abwechselndes Stillstehen der einen und der anderen Uhr herbeiführen kann (sympathische Uhren). Ein etwas anderes Beispiel bilden zwei aneinander hängende Pendel (Fig. 8), die z. B. durch einen Kronleuchter und daran hängenden Beleuchtungskörper gebildet werden können. Man kann hier gelegentlich die Schwebungs-



Fig. 8.



Fig. 9.

erscheinungen des unteren Pendels sehr deutlich beobachten. — Eine Glocke mit ihrem Klöppel (Fig. 9) bildet ein gleiches System. Man muß vermeiden, daß beim Läuten nur die eine Hauptschwingung erregt wird, bei der der Klöppel relativ zur Glocke in Ruhe bleibt, also nicht anschlägt, ein Fall, der bei der Kaiserglocke des Kölner Domes 1876 eintrat, so daß eine Aenderung der Aufhängung vorgenommen werden mußte.[1]) Bei den Schwingungen eines Schiffes sollen umgekehrt darin aufgehängte Lampen u. dgl. möglichst wenig mitschwingen. Man erreicht dieses durch eine Aufhängung mit von der Schiffsschwingung möglichst abweichender Schwingungsdauer.

Die sich ineinander umsetzenden Schwingungen brauchen durchaus nicht gleichartig zu sein. Eine an einer Spiralfeder hängende Scheibe (Fig. 10) kann z. B. einerseits auf- und abwärts longitudinale Schwingungen, andererseits drehende Torsionsschwingungen ausführen. Eine Kopplung beider Schwingungen findet hier dadurch statt, daß die Feder sich beim Auf- und Zudrehen verlängert und verkürzt und

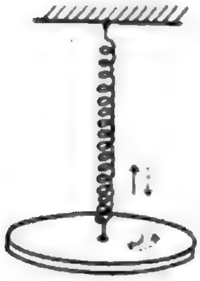


Fig. 10.

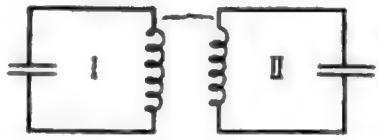


Fig. 11.

umgekehrt. In der Tat erhält man bei gleicher Schwingungsdauer beider Schwingungen und geeigneter Erregung den überraschenden Zustand, daß die Scheibe zeitweise stark auf und ab schwingt, ohne sich zu drehen, zeitweise wieder in vertikaler Richtung vollständig in Ruhe ist und sich nur stark hin und her dreht.

Elektrische Schwingungskreise lassen sich einerseits dadurch koppeln, daß man die Stromspulen beider Kreise nahe aneinander rückt (Fig. 11), wodurch das Magnetfeld der einen Spule auch die andere Spule durchsetzt, also in ihr Spannungen induziert (magnetische oder induktive Kopplung), oder dadurch, daß beide Kreise einen Teil des Stromkreises gemeinsam haben (Fig. 12), wodurch natürlich auch eine Ein-

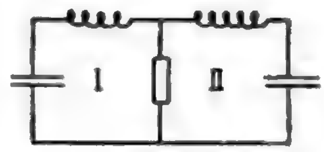


Fig. 12.

wirkung der Kreise aufeinander zustande kommt (galvanische Kopplung). Die Erscheinungen sind genau dieselben wie bei den mechanischen, gekoppelten Systemen, nur daß die Schwingungen meist viel schneller verlaufen und der ganze Vorgang sich vielfach innerhalb einer zehntausendstel Sekunde abspielt. Trotzdem ist es auch hier gelungen, die auftretenden Schwebungserscheinungen experimentell zu verfolgen, und z. B. den zeitlichen Verlauf der Stromstärken als Kurven aufzunehmen. Diese entsprechen dann sehr genau den in Fig. 5 gezeichneten Kurven.

In der drahtlosen Telegraphie spielt die Kopplung elektrischer Schwingungskreise eine wichtige Rolle. Näheres s. im Artikel „Schwingungen, elektrische" und „Schwingungen, erzwungene".

IV. Schwingungen mit unendlich vielen Freiheitsgraden.

1. Uebergang zu immer mehr Freiheitsgraden. Streng genommen besitzen alle Systeme unendlich viele Freiheitsgrade, da sie ja aus unendlich vielen Punkten bestehen, die sich zum mindesten unter der Wirkung der Elastizität gegeneinander verschieben können. Eine Schaukel kann z. B. nicht nur in normaler Weise vorwärts und rückwärts schwingen, sondern auch seitlich hin und her pendeln, sich um ihre Achse drehen, die Ketten, an denen sie hängt, können in Vibrationen geraten, das Schaukelbrett kann durch einen Schlag zum Tönen gebracht, d. h. in Schwingungen versetzt werden usw. Trotzdem genügt es meist

[1]) Veltmann, „Ueber die Bewegung einer Glocke". Dinglers polytechnisches Journal, Bd. 220, 1876.

wenn wir die Schaukel als ein System mit nur einem Freiheitsgrade betrachten, das nur die eine Schwingung ausführen kann, die wir mit dem Begriff „Schaukel" ohne weiteres verbinden. Abgesehen davon, daß wir die Möglichkeit haben, diese wichtigste Hauptschwingung mit beliebiger Annäherung allein herzustellen, können wir auch sonst meistens die übrigen Schwingungen vernachlässigen, da sie mit der Hauptschwingung nicht gleichwertig sind und deren Schwingungsbild praktisch nicht verändern. Eine gewisse Vorsicht ist dabei freilich notwendig. Die Querschwingungen der Schaukel, die bei hohen Schwingungen aus der Hauptschwingung bei kleiner Unsymmetrie entstehen, werden besonders wichtig bei der Frage, ob die Schaukel an die seitlichen Pfosten anschlagen kann: und bei der an einer Spiralfeder auf und ab tanzenden, in Figur 10 gezeichneten Scheibe können im Resonanzfall die sonst zu vernachlässigenden Torsionsschwingungen eine vollständige Veränderung des Schwingungsverlaufes hervorrufen, so daß wir das System als ein mit zwei Freiheitsgraden behaftetes betrachten mußten. Die Zahl der Freiheitsgrade, die wir einem System zuschreiben, ist daher bis zu einem gewissen Grade willkürlich. Wir wollen unter Systemen von unendlich vielen Freiheitsgraden solche verstehen, deren verschiedene Schwingungsformen sich durch einige wenige Schwingungsmöglichkeiten und deren Ueberlagerung nicht mehr genügend genau darstellen lassen.

Von mechanischen Systemen kommen fast ausschließlich die elastischen Körper und zwar besonders solche von einfachen Formen in Betracht. Das Neuartige bei diesen ist, daß der ganze Körper in sich in Schwingungen gerät. Wir dürfen uns nicht mehr die Schwingungsmasse an einem Punkte konzentriert denken, der durch eine als masselos angenommene Feder oder dgl. hin und her gezogen wird; Schwingungsmasse und elastische Kraft sind vielmehr über den ganzen Körper gleichmäßig verteilt, jeder einzelne Punkt des Körpers bildet gewissermaßen ein kleines, schwingungsfähiges System. Ein Beispiel wird diesen Unterschied am besten erläutern.

Zwischen den Punkten A und B im Abstand l (Fig. 13) sei ein Faden gezogen, der durch das schwere Gewicht p sehr straff angespannt w rd, etwa indem der Faden bei B über eine Rolle läuft. In der Mitte des Fadens sei eine Kugel von der Masse M befestigt, die so groß ist, daß die Masse des Fadens dagegen verschwindet. Es sollen ferner nur horizontale Bewegungen der Kugel vorkommen, so daß die Wirkung der Schwerkraft auf die Kugel nicht in Betracht kommt. Wenn wir die Kugel um ein Stück a seitlich ablenken (Fig. 14), so treibt die Fadenspannung sie mit einer Kraft zurück, die sich nach dem Parallelogramm der Kräfte für kleine Ausschläge aus der Beziehung $x:p = 2a:\frac{l}{2}$ zu $x = \frac{4p}{l}a = Da$ berechnet, wenn wir $\frac{4p}{l} = D$ setzen. D ist also eine quasi-elastische Kraft, die proportional dem Ausschlage a ist, so daß die Kugel M sinusförmige Schwingungen von der Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{\frac{M}{D}} = \pi\sqrt{\frac{Ml}{p}}$ ausführt (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegung"). Eine andere Schwingungsform kann die Kugel unter den gemachten Voraussetzungen nicht ausführen. Sie stellt ein System mit einem Freiheitsgrade dar.

Wenn wir jetzt zwei Kugeln an dem Faden befestigen, so haben wir analog den zwei Pendeln, die miteinander gekoppelt waren, ein System mit zwei Freiheitsgraden. In der Tat erhalten wir die beiden Hauptschwingungen, wenn wir beide Kugeln einmal nach derselben Seite (Fig. 15) und ein anderes Mal nach entgegengesetzten Seiten (Fig. 16) gleich weit ausheben und gleichzeitig loslassen. Es folgt schon aus Symmetrie, daß hierbei keine Vergrößerung des Ausschlages einer Kugel auf Kosten der anderen erfolgen kann. Wird dagegen nur eine Kugel allein angestoßen, so leuchtet

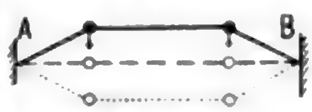


Fig. 15.

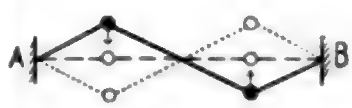


Fig. 16.

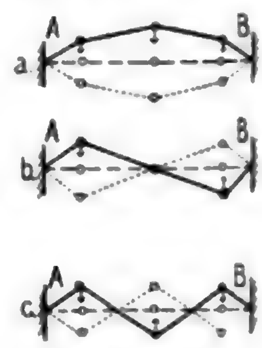


Fig. 17.

ohne weiteres ein, daß dann die andere Kugel nicht dauernd in Ruhe bleibt, also Schwebungserscheinungen eintreten, d. h. beide Hauptschwingungen erregt sind.

Ganz analog würden wir bei drei Kugeln auf dem Faden ein System mit drei Freiheitsgraden und drei Hauptschwingungen (Fig. 17a, b, c) haben, bei vier Kugeln vier Freiheits-

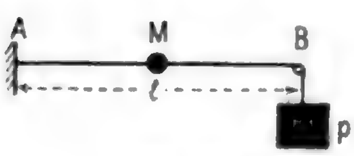


Fig. 13.

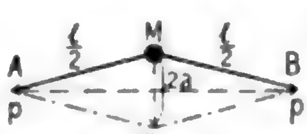


Fig. 14.

grade usw. Nun besitzt aber der Faden an sich auch eine träge Masse. Ein einfacher gespannter Faden ohne Kugeln muß daher auch Schwingungen ergeben und zwar derselben Art, als wenn auf ihm eine sehr große Zahl von Kugeln, jede mit entsprechend kleiner Masse, dicht nebeneinander aufgereiht wären, da ja die Masse des Fadens gleichmäßig über seine ganze Länge verteilt ist. Das bedeutet aber, daß der Faden unendlich viele Freiheitsgrade hat und daher unendlich viele Hauptschwingungen ausführen kann. Jeder Teil des Fadens kann gegen seine Nachbarn Schwingungen ausführen, ist aber gleichzeitig mit ihnen gekoppelt und sucht sie zum Mitschwingen zu bewegen. In der Physik pflegt man die Schwingungen eines solchen Fadens als Saitenschwingungen zu bezeichnen. Sie sind theoretisch wie experimentell sehr eingehend untersucht worden, und diese Untersuchungen bilden die Grundlage, auf der sich die Theorie der übrigen Schwingungserscheinungen bei unendlich vielen Freiheitsgraden aufbaut. Es soll daher auch hier auf sie etwas näher eingegangen werden. Auf eine strenge Ableitung der Resultate muß freilich verzichtet werden, da die Theorie solcher aus unendlich vielen unendlich kleinen Teilen bestehender Körper nur mit Hilfe von Differentialgleichungen zu lösen ist.

2. Saitenschwingungen. Unter einer Saite versteht man physikalisch einen Körper, der im wesentlichen nur nach einer Richtung hin ausgedehnt ist und keine Steifigkeit besitzt, d. h. im ungespannten Zustande einer Verbiegung keine Kräfte entgegensetzt. Die auf die einzelnen Teile der Saite wirkenden Kräfte werden dann nur durch die Spannung der Saite hervorgerufen. Ist die Saite gerade ausgestreckt, so heben sich die Zugkräfte nach beiden Richtungen gegenseitig auf; ist dagegen die Saite (etwa während einer Schwingung) gekrümmt, so wirkt eine resultierende Kraft, die die Saite wieder gerade zu strecken sucht und die um so größer ist, je größer die Krümmung an der betreffenden Stelle und je größer die Anspannung der Saite ist. Die wirkliche Saite, etwa eine Klavier- oder Violinsaite, ein Faden, Draht oder Gummischlauch, wird mit der physikalischen nur übereinstimmen, wenn die von der Anspannung herrührenden Kräfte die in Wirklichkeit stets vorhandenen Kräfte der Steifigkeit stark überwiegen. Auf schlaff gespannte Saiten ist daher die einfache Theorie der Saite nicht mehr anwendbar, sie läßt sich aber dahin erweitern.

2a) Theorie der Hauptschwingungen. Wir wollen zunächst wieder die verschiedenen Hauptschwingungen aufsuchen, durch deren Ueberlagerung wir dann jede beliebige Schwingungsform erhalten können. Die erste Hauptschwingung, die „Grundschwingung“, einer an zwei Punkten befestigten Saite ist die durch Figur 18, a bis d, gekennzeichnete Bewegung. Jeder einzelne Teil der Saite führt eine sinusförmige schwingende Bewegung senkrecht zur Saite

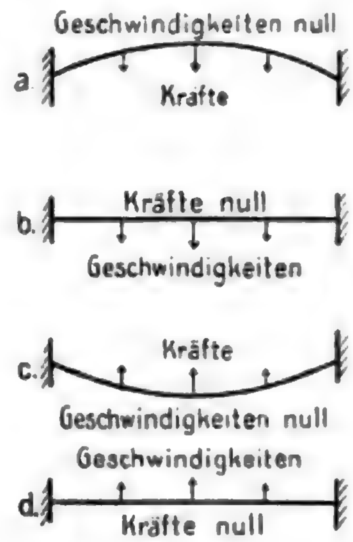


Fig. 18.

aus. Die maximalen Ausschläge sind in der Mitte am größten, nehmen nach beiden Seiten hin nach einer Sinuskurve ab und sind an den Befestigungspunkten natürlich Null. In dem Augenblick, wo die Saite nach einer Richtung am weitesten ausgeschwungen ist (Fig. 18a), bleibt sie einen Moment lang ihrer ganzen Länge nach in Ruhe, indem die Bewegung überall gleichzeitig ihre Richtung umkehrt. Wegen ihrer Krümmung treten aber sofort die resultierenden Spannungskräfte in Wirkung und treiben die Saite der Mittellage zu. Diese wird wieder auf der ganzen Länge gleichzeitig passiert. Die Geschwindigkeit ist in der Mitte der Saite, wo wegen der größten Krümmung in der Lage a auch die größten Kräfte auftraten, am größten. Die Saite schwingt dann wegen ihrer kinetischen Energie über die Mittellage b hinaus bis in die Lage c. Hier kehrt nach einem Moment der Ruhe wieder die Bewegung um und geht über die Lage d wieder zur Lage a über. Der Schwingungsverlauf ist also ganz ähnlich dem, als wenn die ganze träge Masse der Saite in einer Kugel auf der Mitte der Saite konzentriert wäre.

Die Dauer einer ganzen Schwingung ist durch die Gleichung

$$T = 2l\sqrt{\frac{m}{p}}$$

bestimmt; in Worten: die Schwingungsdauer T ist um so größer, die Schwingung verläuft um so langsamer, je größer die Länge l und die Masse m der Längeneinheit, also bei

gleichem Material, je dicker die Saite, ferner je kleiner die Spannung p der Saite ist. Daß eine größere Anspannung die Schwingung beschleunigt, eine größere in Bewegung zu setzende Masse sie verlangsamt, leuchtet ein. Daß eine größere Länge der Saite die Schwingungen verlangsamt, rührt daher, daß bei gleicher Entfernung aus der Mittellage die Krümmung der Saite und somit die resultierenden Spannungskräfte bei größerer Länge vermindert werden. Vergleicht man diese Formel mit der früheren $T = \pi \sqrt{\frac{Ml}{p}}$ für eine Kugel von der Masse M in der Mitte der Saite, so muß man zunächst bedenken, daß jetzt m die Masse pro Längeneinheit, die Masse der ganzen Saite also $M' = ml$ ist. Führt man diese Masse ein, so wird $T = 2 \sqrt{\frac{M'l}{p}}$, also bis auf den Faktor 2 statt π mit der früheren Formel identisch. Dieser Unterschied ist leicht verständlich, da ja bei der wirklichen Saite durchaus nicht ihre ganze Masse so stark an der Schwingung teilnimmt, wie der mittlere Teil. Die Enden bleiben vielmehr fast ganz in Ruhe, brauchen also fast gar nicht beschleunigt zu werden. Dieses Verhältnis $2:\pi$ tritt immer auf, wenn wir eine Schwingung mit sinusförmig verteilter Amplitude durch eine andere ersetzen, die überall die gleiche Amplitude und zwar die höchste der ersteren besitzt (Fig. 19). Es rührt dies daher, daß der von der Sinuslinie begrenzte Flächeninhalt $\int_0^\pi \sin x \, dx = 2$, der Flächeninhalt des Rechtecks dagegen $1 \times \pi = \pi$ ist.

Weitere Hauptschwingungen, die „Oberschwingungen“, sind in Figur 20 gezeichnet. Man erkennt leicht die Analogie zu den in Figur 16 und 17c gezeichneten Schwingungen bei 2 und 3 auf der Saite befestigten Kugeln. Die Saite teilt sich in eine Anzahl gleicher Teile, von denen jeder für sich genau in der Art der Grundschwingung schwingt. Es entstehen dadurch mitten auf der Saite Knotenpunkte, die dauernd in Ruhe bleiben, sich also wie Befestigungspunkte verhalten, ohne daß irgendeine Befestigung dort vorhanden wäre. Dies kommt dadurch zustande, daß die Teile zu beiden Seiten eines solchen Knotenpunktes stets in entgegengesetzten Phasen schwingen. In dem gezeichneten Augenblicke des größten Ausschlages, in dem also wieder die Saite ihrer ganzen Länge nach in Ruhe ist, wirken auf den Knotenpunkt keine Kräfte, da in ihm die Krümmung der Saite gerade Null ist, indem sie von einer konkaven in eine konvexe übergeht. Nach einer viertel Periode schwingt die ganze Saite gleichzeitig in ihrer ganzen Länge durch die Mittellage, aber die Geschwindigkeit ist zu beiden Seiten des Knotenpunktes entgegengesetzt und im Knotenpunkt selbst Null. Da der Knotenpunkt, aber auch nur der eine Punkt, vollständig in Ruhe bleibt, darf es nichts ausmachen, wenn man ihn etwa durch ein scharfkantiges Lineal festhält. Die Schwingungsdauer muß die einer gleichen Saite sein, deren Länge gleich dem Abstande der Knotenpunkte ist und die in der Grundschwingung schwingt. Das ist in der Tat der Fall. Die Frequenz der Grundschwingung und der Oberschwingungen stehen also im Verhältnisse 1:2:3:4 usw.

Die Knotenpunkte lassen sich bei sehr weiten Schwingungen ohne weiteres erkennen und z. B. mit einem einige Meter langen Gasschlauch, den man an einem Ende rhythmisch hin und her bewegt, leicht demonstrieren. Bei straff gespannten Fäden oder Drähten kann man stärkere Schwingungen an einer Verdickung der Saite erkennen, die an den Knotenpunkten nicht eintritt. Besser setzt man auf die Saite kleine, leichte Reiterchen, die die Schwingungen nicht stören und an den in Bewegung befindlichen Stellen abgeworfen werden, also nur in der Nähe der Knotenpunkte sitzen bleiben. Es ist freilich dazu nötig, eine der Hauptschwingungen ganz rein zu erregen. Das geschieht am besten nach Melde dadurch, daß man das eine Ende der Saite an einer Stimmgabel befestigt (Fig. 21) und, zweckmäßig durch Verlängern der Saite, die Frequenz der Stimmgabel mit der gewünschten Hauptschwingung der Saite in Einklang bringt.

Mit diesen Typen sind die Hauptschwingungen der Saite erschöpft. Alle

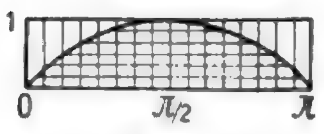


Fig. 19.

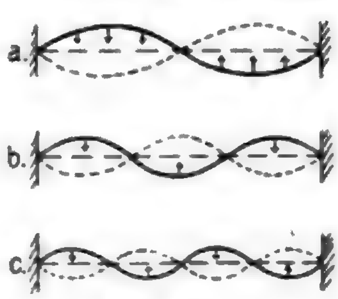
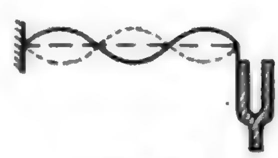


Fig. 20


Fig. 21.

übrigen überhaupt nur möglichen Schwingungsformen der Saite lassen sich daher als eine Ueberlagerung von Grundschwingung und Oberschwingungen auffassen. Dieser wichtige Satz entspricht dem Fourierschen Theorem (s. den Artikel „Fouriersches Theorem“), daß sich jede periodische Bewegung eines einzelnen Punktes als Ueberlagerung sinusförmiger Schwingungen mit den Periodenzahlen 1:2:3... darstellen läßt. Auch hier wird in den meisten praktischen Fällen die Amplitude um so kleiner, je größer die Ordnungszahl ist. Daher spielen die hohen Oberschwingungen meist nur eine unwesentliche Rolle. Die sich überlagernden Grund- und Oberschwingungen sind im allgemeinen nicht in Phase miteinander. Es gibt dann weder einen Zeitpunkt, in dem die ganze Saite gleichzeitig in Ruhe ist, noch einen, in dem die ganze Saite die Mittellage passiert, da, wenn dies etwa für die Grundschwingung der Fall wäre, sich die Oberschwingungen in einer anderen Bewegungsphase befinden, und umgekehrt. Auch Knotenpunkte treten dann nur an den beiden Enden, den Befestigungspunkten, aber nicht mehr auf der Saite selbst auf, da die Knotenpunkte der verschiedenen Oberschwingungen nicht zusammenfallen. Da die Perioden der Grund- und ersten Oberschwingungen stark abweichen, treten eigentliche Schwebungserscheinungen meist nicht auf. Die Gestalt der Saite nimmt vielmehr nur eine mehr oder weniger unregelmäßige Form an. Die schwingende Bewegung der einzelnen Teile der Saite in senkrechter Richtung besteht dann auch in einer entsprechenden Ueberlagerung sinusförmiger Schwingungen.

Man könnte meinen, daß mit der theoretischen Erkenntnis, daß jede noch so komplizierte Saitenschwingung aus einer Ueberlagerung von Grund- und Oberschwingungen bestehe, nicht viel gewonnen sei. Und doch liefert uns dies Resultat eine Fülle interessanter Folgerungen. Zunächst hat diese Zerlegung vom musikalischen Standpunkte aus große Bedeutung. Wir empfinden nämlich merkwürdigerweise gerade die sinusförmige Schwingung als das, was wir als reinen musikalischen Ton bezeichnen und ein geübtes Ohr findet aus einem Zusammenklang diese verschiedenen Töne heraus, führt also eine der mathematischen genau entsprechende Zerlegung komplizierter Schwingungen aus. Aber auch physikalisch lassen sich aus der Möglichkeit der Zerlegung wichtige Folgerungen ableiten. Erregt man die Saite an einer bestimmten Stelle, etwa durch Zupfen wie bei der Zither, so können diejenigen Oberschwingungen nicht entstehen, die an der Erregungsstelle einen Schwingungsknoten haben und die übrigen Oberschwingungen werden um so stärker erregt, je näher die Erregungsstelle mit einem ihrer Schwingungsbäuche, den Stellen der größten Bewegung, zusammenfällt. Bringt man umgekehrt eine bestimmte Stelle einer schwingenden Saite zur Ruhe, etwa durch ein kurz dauerndes, loses Auflegen des Fingers, so wird jede der Schwingungen um so stärker gedämpft, je größer ihre Bewegung an der berührten Stelle ist, und es werden im wesentlichen nur diejenigen Schwingungen übrig bleiben, die dort einen Knotenpunkt besitzen. Die Klangfülle bei einem Klavier, d. h. das richtige Verhältnis der Grund- und Obertöne beruht also wesentlich mit darauf, daß der Anschlag und die Dämpfung der Saiten an der richtigen Stelle erfolgt.

2b) Theorie der stehenden Wellen. Außer dieser von der Zahl der Freiheitsgrade und den Hauptschwingungen ausgehenden Theorie gibt es noch eine andere, von der bisherigen durchaus verschiedene Darstellungsweise der Bewegungsvorgänge von Saiten. Diese entspricht dem Huyghensschen Prinzip bei der Ausbreitung von Licht- und Schallwellen und geht davon aus, daß sich auf einer langen Saite kleine Ausbiegungen wellenartig fortpflanzen (Fig. 22).

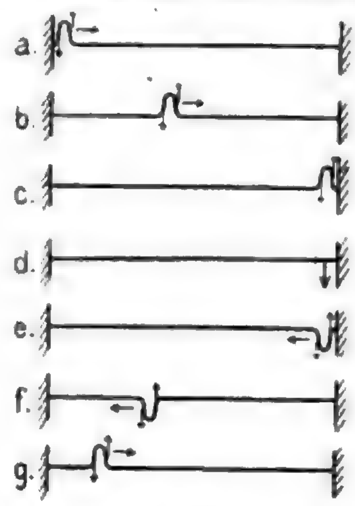


Fig. 22.

Man kann dies leicht zeigen, indem man gegen ein lang ausgespanntes Seil mit der scharfen Handkante einen kurzen Schlag gibt. Die Erschütterung pflanzt sich dann mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit längs des Seiles fort, indem das Seil im übrigen vollkommen ruhig bleibt. Wäre das Seil unendlich lang, so würde die Welle immer weiter laufen. Ist aber das Seil an seinen Enden befestigt, so wird die Welle am Ende reflektiert (Fig. 22, c, d, e) und läuft wieder zum Anfang zurück (f), wo sie abermals reflektiert wird usw. Die Theorie zeigt nun, daß man jeden Anfangszustand der Saite in eine Summe solcher Elementarwellen auflösen kann und daß die weiteren Be-

wegungsvorgänge so verlaufen, daß sich jede Elementarwelle längs der Saite ungestört fortpflanzt und die Gesamtbewegung gleich der Summe aller dieser Einzelbewegungen ist. Die Hauptschwingungen sind nach dieser Theorie stehende Wellen, die immer dann entstehen, wenn zwei gleichartige Wellenzüge von entgegengesetzter Richtung, die ursprünglichen und die reflektierten Wellen, gegeneinander laufen. Man gebraucht dann die leicht verständlichen Ausdrücke: In der Grundschwingung (Fig. 18) schwingt die Saite in einer halben Wellenlänge, in der ersten Oberschwingung (Fig. 20a) in einer ganzen Wellenlänge, in der zweiten (Fig. 20b) in $^3/_2$ Wellenlängen usw. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen längs der Saite ergibt sich zu $v = \sqrt{\frac{p}{m}}$.

Die Zeit $T = 2l\sqrt{\frac{m}{p}}$, während der nach der früheren Darstellung die Saite einmal auf- und ab schwingt, entspricht der Zeit $T = \frac{2l}{v}$, also der Zeit, während der eine Welle längs der Saite (von der Länge l) einmal hin und her läuft. Beide Theorien ergeben natürlich dasselbe Resultat. Sie heben gewissermaßen nur eine andere Seite desselben Vorgangs hervor. Die erstere betont besonders den zeitlichen Wechsel der Bewegung der Saite als ganzes, die letztere den örtlichen Wechsel, die Fortpflanzung einer Störung längs der Saite.

Die zweite Theorie ist besonders geeignet, uns ein Bild von dem Aussehen der ganzen Saite während der Schwingung zu geben, zumal, wenn die Saite anfangs eine besonders einfache Form hat. Dies ist z. B. der Fall, wenn wir die Schwingung wie bei der Zither durch Ausbiegen eines Punktes der Saite und Loslassen erregen. Die Anfangsform ist dann die in Figur 23a dargestellte. Die Saite ist vollständig in Ruhe, es ist also nur potentielle Energie vorhanden. Da die Saite nur an dem obersten ausgebogenen Punkte C gekrümmt ist, treten zunächst auch nur hier Kräfte und Bewegungen auf. Der Punkt C reißt dann seine Nachbarteile mit sich, so daß sich der Bewegungszustand b ergibt, bei dem sich das Stück DE abwärts bewegt, alles übrige noch in Ruhe ist. Die Bewegung teilt sich dann entsprechend dem Weiterlaufen einer Wellenfront immer weiteren Nachbarteilen mit, so daß die Knickstellen D und E scheinbar mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{\frac{p}{m}}$ nach beiden Richtungen hin die Saite entlanglaufen, bis der Punkt E am Ende ankommt (c); hier findet eine Reflexion statt, der Punkt E läuft in entgegengesetzter Richtung weiter, das Stück BE (d) ist in Ruhe, nur das Stück DE in Bewegung. Schließlich kommt auch D am Ende A an (e) und wird reflektiert, d. h. läuft jetzt

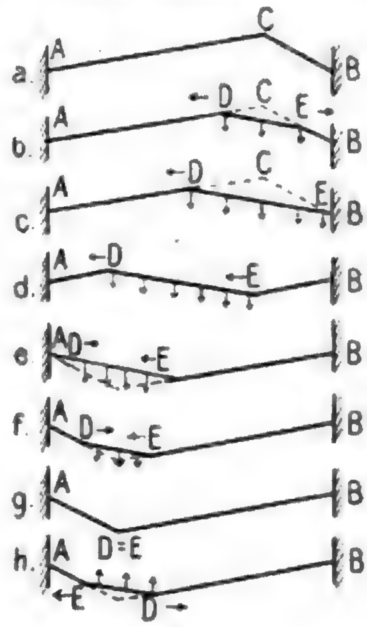


Fig. 23.

E entgegen (f); das in Bewegung befindliche Stück DE wird immer kleiner, die kinetische Energie setzt sich wieder vollständig in potentielle um, denn im Moment, wo D und E zusammenstoßen (g), ist die Saite wieder vollständig in Ruhe und hat eine der Anfangslage entsprechende Form. Derselbe Prozeß wiederholt sich daher nochmals: die Punkte D und E laufen wieder auseinander, das Stück DE kommt wieder in Bewegung (h), jetzt aber natürlich nach oben, in den Endpunkten werden D und E wieder reflektiert, die Saite nimmt also alle früheren Formen in umgekehrter Reihenfolge wieder an, nur daß das bewegte Stück sich in entgegengesetzter Richtung bewegt. Nach einer ganzen Schwingungsdauer $T = \frac{2l}{v} = 2l\sqrt{\frac{m}{p}}$ haben beide Punkte D und E die ganze Saite hin und zurück durchlaufen und treffen wieder in C zusammen, so daß der ursprüngliche Zustand a genau wieder hergestellt ist. Während der zweiten Periode wiederholt sich der ganze Vorgang identisch noch einmal, ebenso während der folgenden.

Dieser einfache Schwingungsvorgang läßt sich qualitativ auch ohne weitere Theorie herleiten. Man hat nur einerseits zu beachten, daß auf den geradlinigen Stücken ohne Krümmung keine Kräfte wirken, hier also keinerlei Aenderung der Geschwindigkeit eintreten kann. Die Strecken in Ruhe bleiben also in Ruhe, die bewegten bewegen sich gleichmäßig weiter, andererseits ist in

den Ecken die Krümmung und damit die Geschwindigkeitsänderung sehr groß, es tritt ein plötzlicher Uebergang von Ruhe zu Geschwindigkeit oder umgekehrt von Geschwindigkeit zu Ruhe ein. Dieser Geschwindigkeitssprung ist proportional der Stärke der Krümmung, d. h. dem Winkel an der Ecke. Da aber die Punkte D und E gleich schnell von C aus fortlaufen, so ist das Dreieck CDE (Fig. 23b und c) gleichschenklig, die Winkel bei D und E sind gleich groß, so daß die bei D und die bei E zu dem in Bewegung befindlichen Stück hinzukommenden Teile aus der Ruhe auf die gleiche Geschwindigkeit gebracht werden. Da die Winkel auch weiterhin ihre Größe beibehalten, muß der ganze zwischen D und E liegende Teil gleiche Geschwindigkeit besitzen.

Natürlich könnten wir diesen Schwingungsvorgang auch nach der ersten Theorie durch Ueberlagerung von Grund- und Oberschwingungen ableiten. Scharfe Ecken, wie sie hier auftreten, sind dabei im allgemeinen ein Zeichen dafür, daß auch sehr hohe Oberschwingungen noch merklich vorhanden sind. Diese entsprechen aber sehr hohen, kaum noch wahrnehmbaren Tönen, die wir als unangenehm empfinden. Der Klang einer Zither hat daher etwas scharfes, ist nie so angenehm wie der der weich angeschlagenen Klaviersaite.

Wir haben bisher nur von Saitenschwingungen gesprochen, die in einer einzigen Ebene liegen. Die Saite kann aber auch rotierende Schwingungen ausführen, wie ein Fadenpendel nicht nur in einer Ebene hin und her, sondern auch im Kreise herumschwingen kann. Es läßt sich aber zeigen, daß man alle anderen Schwingungen in zwei zueinander senkrechte ebene Schwingungen zerlegen kann, die unabhängig voneinander in der bisher beschriebenen Weise verlaufen. Wir erhalten daher prinzipiell nichts Neues. Nur die Bahnen, die die einzelnen Punkte der Saite beschreiben, liegen nicht mehr auf einer Geraden, sondern sind komplizierte Figuren. Sie sind Ellipsen, wenn die Saite in beiden zueinander senkrechten Richtungen in derselben Hauptschwingung schwingt, Lissajoussche Figuren, bei zwei verschiedenen Hauptschwingungen (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegungen").

3. Weitere mechanische Schwingungen. 3a) Allgemeines. Wir haben uns mit den Saitenschwingungen so ausführlich befaßt, weil alle dort auftretenden Probleme sich im wesentlichen bei den übrigen Systemen mit unendlich vielen Freiheitsgraden wiederholen. Insbesondere kann man auch bei diesen einen beliebigen Schwingungszustand einerseits als eine Ueberlagerung von Hauptschwingungen, andererseits als Bildung stehender Wellen durch Reflexion fortschreitender Wellen an der Begrenzung auffassen und daraus analoge Folgerungen wie bei der Saite ziehen. Wir können uns daher bei den Schwingungsformen der übrigen körperlichen Gebilde wesentlich kürzer fassen.

Zunächst haben wir ganz allgemein zwischen Transversal-, Longitudinal- und Torsionsschwingungen zu unterscheiden. Bei Transversal- oder Biegungsschwingungen werden die Nachbarteile durch Schubkräfte mitgerissen, die Bewegungsrichtung selbst steht senkrecht zur Richtung der Fortpflanzung der Bewegung auf die Nachbarteile (Fig. 24). Die bisher betrachteten Saitenschwingungen sind solche Transversalschwingungen. Da Flüssigkeiten und Gase der Bewegung benachbarter Teile aneinander vorbei keine solche Schubkräfte entgegensetzen, können in ihnen elastische Transversalwellen nicht entstehen. Die gewöhnlichen Wasserwellen sind dagegen Transversalwellen, aber nicht durch elastische Kräfte, sondern durch die Schwerkraft bedingt. Bei den longitudinalen Schwingungen wirken dagegen die benachbarten Teilchen stoßartig aufeinander, d. h. die Fortpflanzung der Bewegung fällt in die Richtung der Bewegung selbst (Fig. 25). Die elastischen Kräfte sind hier reine Druckkräfte; man könnte diese Schwingungen daher zweckmäßig als Druckschwingungen bezeichnen. Longitudinale Schwingungen führen hauptsächlich die Gase aus, da sie sich besonders leicht zusammendrücken lassen; doch treten sie

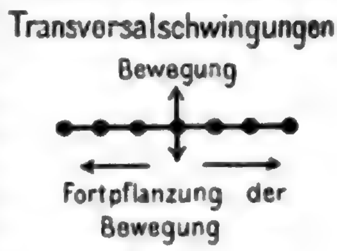


Fig. 24.

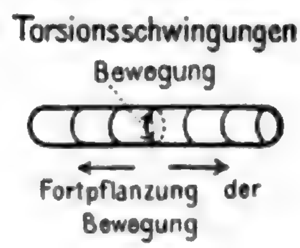


Fig. 26.

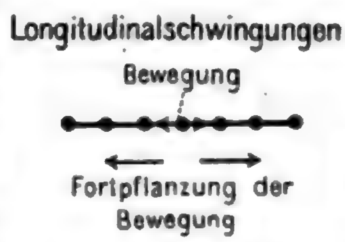


Fig. 25.



Fig. 27.

auch bei festen Körpern und Flüssigkeiten auf, die ja auch alle ein wenig kompressibel sind.

Torsionsschwingungen schließlich sind

eine spezielle Art von Transversalschwingungen bei stabförmigen Körpern, bei denen die schwingende transversale Bewegung in einer Verdrehung der einzelnen Querschnitte gegeneinander besteht (Fig 26).

3b) **Stäbe und Pfeifen, Stimmgabeln.** Besonders einfach sind die Schwingungen eindimensionaler Gebilde, zu denen außer der Saite die Stäbe und Pfeifen gehören. Die Pfeifen, einfache prismatische Hohlräume, z. B. Röhren — die Anblasevorrichtungen kommen hier nicht in Betracht — sind gewissermaßen Stäbe aus Luft und können ebenso wie ein angeschlagener Stab Eigenschwingungen ausführen. Es kommt nämlich physikalisch nur auf die Begrenzung des schwingenden Körpers an und darauf, daß an dieser Begrenzung die schwingende Bewegung keine Nachbarteile mehr in Bewegung setzen kann. Wie aber eine schwingende Saite und ein schwingender Stab durch die umgebende Luft nicht wesentlich gestört werden, da die Luft zu elastisch und leicht im Vergleich zu den festen Körpern ist, so kann auch umgekehrt die in einer Pfeife hin und her schwingende Luft die festen Wandungen nicht merklich in Bewegung setzen, da diese im Vergleich zur Luft zu schwer und starr sind. Freilich müssen die Pfeifenwandungen eine gewisse Dicke besitzen, aus dünnem Papier könnte man sie z. B. nicht herstellen. Darauf beruht es, daß mit Flüssigkeit gefüllte Pfeifen, z. B. unter Wasser getauchte, schwerer in Eigenschwingungen geraten: der schwingende Körper und seine Begrenzung verhalten sich der Masse und Elastizität nach zu ähnlich. Bei dicken Wandungen lassen sich aber auch Wasserpfeifen gut anblasen, wie experimentell mehrfach festgestellt ist.

Eine Besonderheit der Enden muß noch erwähnt werden. Bei der Saite sind beide Endpunkte befestigt, so daß hier keinerlei Bewegungen zustande kommen, obwohl die Saite auf die Enden während der Schwingung periodisch schwankende Kräfte ausübt. Dasselbe können wir auch bei Stäben und Pfeifen erreichen, bei Stäben, indem wir das Stabende fest einklemmen, etwa in einen schweren Schraubstock, dessen Masse so groß gegenüber der des Stabes ist, daß er nicht merklich mitbewegt wird; bei Pfeifen, indem wir das Ende durch eine Wand abschließen, die nur so dick zu sein braucht, daß sie von der Luft nicht merklich in Bewegung gesetzt wird. Andererseits kann aber das Stabende auch frei in die Luft hinausragen, so daß sich die Endteilchen besonders leicht bewegen können, da sie ja an ihrer einen Seite keine mitzureißenden Nachbarteilchen haben. An einem solchen Ende können umgekehrt keine Kräfte, kein Druck auftreten, da das Ende ja frei und keinem Zwange unterworfen ist. Etwas ähnliches ist bei einer Pfeife der Fall, deren Ende vollkommen offen ist: die Luft ist an solchem Ende nicht mehr zwischen die Wandungen eingezwängt (Fig. 27), kann sich frei nach allen Seiten hin bewegen, so daß an diesem Punkte keine Druckschwankungen auftreten können. Allerdings ist diese Vorstellung nur angenähert richtig, da sich ja außen auch Luft befindet, die durch die von innen kommende zurückgedrängt werden muß. Dies bedingt eine Korrektur, die man praktisch dadurch in Rechnung bringen kann, daß man nicht das Ende der Wandungen, sondern eine um etwa $1/4$ des Durchmessers weiter hinausliegende Stelle als Pfeifenende ansieht.

Figur 28 zeigt die Grundschwingung einer beiderseits geschlossenen Pfeife oder eines

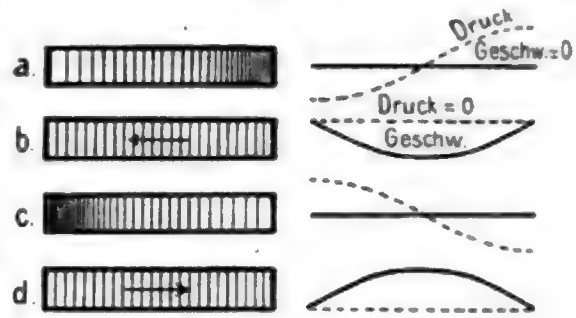


Fig. 28.

beiderseits festgeklemmten, longitudinal schwingenden Stabes. Die nebenstehenden Kurven sollen die Geschwindigkeit (ausgezogen) und den Druck (punktiert) an den verschiedenen Stellen der Pfeife angeben. In der Phase a herrscht links Unter-, rechts Ueberdruck; die ganze Luft ist in Ruhe; der Druck nimmt sinusförmig von links nach rechts zu. Er setzt daher die Luft von rechts nach links in Bewegung, in der Mitte, wo die Druckunterschiede am größten sind, am stärksten. Nach $1/4$ Periode (b) haben sich die Druckunterschiede überall ausgeglichen, die Luft schwingt aber jetzt besonders in der Mitte von rechts nach links, staut sich daher links auf und gibt das Bild c, bei dem der Ueberdruck links, der Unterdruck rechts ist, sonst ist es mit a identisch; die Luft bewegt sich daher wieder nach rechts (d), so daß nach einer vollen Periode wieder der Zustand a erreicht ist.

Die Figur 29 stellt in gleicher Weise die erste Oberschwingung, die Figur 30 und 31 die zweite und fünfte Oberschwingung dar. Die Pfeife teilt sich genau wie die Saite in eine Reihe gleicher Abschnitte, die für sich gleichsam in der Grundschwingung schwingen. Man muß bei den longitudinalen

Druckschwingungen zweierlei Arten von Knoten und Bäuchen unterscheiden: für die Bewegung und für den Druck. An den geschlossenen Enden entstehen Bewegungsknoten, aber Druckbäuche, d. h. Stellen kleinster Bewegung und größter Druckschwankungen, in der Mitte dazwischen liegen Bewegungsbäuche und Druckknoten.

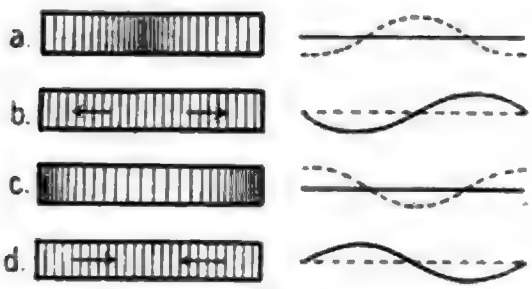


Fig. 29.



Fig. 30.



Fig. 31.

Offene Enden unterscheiden sich von den geschlossenen dadurch, daß in ihnen umgekehrt Bewegungsbäuche und Druckknoten entstehen. Die Grundschwingung einer beiderseits offenen Pfeife ist in ihren verschiedenen Phasen in Figur 32 abgebildet,

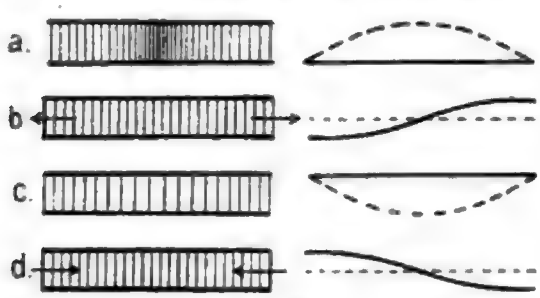


Fig. 32.

die ohne weiteres verständlich sein dürfte. In der Mitte bildet sich ein Bewegungsknoten, so daß man dort eine Wand einsetzen könnte, ohne den Vorgang zu ändern. Jede Hälfte liefert daher für sich das Schwingungsbild einer einerseits offenen, andererseits geschlossenen Pfeife (Fig. 33), eine Anordnung, die praktisch am häufigsten gebraucht wird.

Bei den Hauptschwingungen schwingen die beiderseits geschlossenen und beiderseits offenen Pfeifen in $\frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{4}{2} \ldots$ Wellenlängen, die einerseits offene, andererseits geschlossene in $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4} \ldots$ Wellenlängen. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Luftwelle in nicht zu engen Röhren

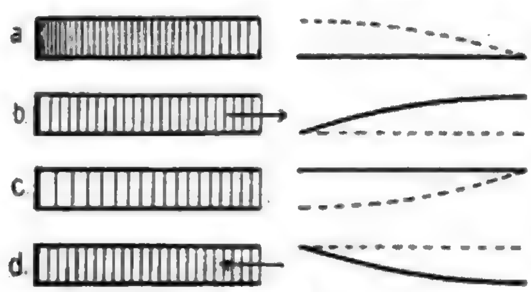


Fig. 33.

ist praktisch ebenso groß, wie in der freien Luft, d. h. wie die gewöhnliche Schallgeschwindigkeit, die bei 17° und mittlerer Feuchtigkeit 340 m/sec beträgt. Daher bestimmt sich die Schwingungsdauer der Grundschwingung einfach zu $\frac{2\,l}{340}$ oder zu $\frac{4\,l}{340}$ sec. l ist dabei in Metern auszudrücken, da wir die Schallgeschwindigkeit auch in m/sec eingesetzt haben. Eine halb offene Pfeife von 50 cm Länge gibt daher einen Grundton von 170 Schwingungen pro Sekunde. Der nächste Oberton macht bei ihr gleich dreimal so viel, also 510 Schwingungen.

Stäbe lassen sich durch Anschlagen ihrer Stirnfläche oder besser und stärker durch Reiben in ihrer Längsrichtung mit einem mit Kolophonium bestrichenen Lappen zum Schwingen bringen, ein Verfahren, durch das man auch gespannte Saiten in longutidinale Schwingungen versetzen kann. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit longutidinaler Wellen in Holz und Metallen durchweg mehrere tausend Meter pro Sekunde beträgt, erhält man mit Stäben normaler Länge sehr hohe Töne. — Bei Pfeifen kann man den Grundton oder auch einen Oberton zum Teil ganz rein, zum Teil mit anderen Obertönen vermischt durch Anblasen eines offenen Endes (Orgel) erzeugen. Jede Flasche kann so zum Tönen gebracht werden, wenn man schräg über ihren Hals hinwegbläst. Ist die Flasche dickbauchig, so wird der Ton tiefer, als es der Formel $\frac{4\,l}{340}$ entspricht, da diese Formel nur für prismatische Pfeifen gilt. Die beiderseits geschlossenen Pfeifen spielen als Resonatoren eine Rolle zur Messung von Frequenzen. Ist z. B. die eine Seite durch ein Telephon T (Fig. 34) abgeschlossen, die andere durch einen verschiebbaren

Kolben K, und wird das Telephon durch Wechselstrom in Schwingungen versetzt, so tritt immer dann Resonanz ein, wenn der Grund- oder ein Oberton der Pfeife mit der Frequenz des Wechselstromes übereinstimmt. Dies läßt sich am Anschwellen der Laufstärke leicht beobachten, die man



Fig. 34.

zweckmäßig an einer kleinen Oeffnung O mit einem Schlauch abhört. Bei starken hohen Tönen kann man die zahlreichen Knoten und Bäuche, in die sich die Pfeife teilt, durch Korkpulver oder dgl. sichtbar machen, das sich an den Bewegungsknoten anhäuft (Kundtsche Staubfiguren. s. Fig. 35). Da der Abstand zweier Knoten

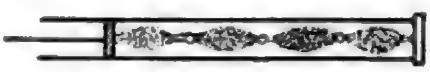


Fig. 35.

gleich einer halben Wellenlänge ist, kann man daraus die Schwingungsdauer nach der Formel $T = \frac{2l}{340}$ leicht berechnen. Bestimmt man auf diese Weise die Schwingungsdauer eines longitudinal schwingenden Stabes, so kann man weiter daraus die Elastizität D des Stabmaterials finden, da beide durch die Formel $T = 2l' \sqrt{\frac{m}{D}}$ verknüpft sind, wobei l' die Stablänge und m das spezifische Gewicht des Stabmaterials bedeutet (Kundt 1866).

Die Druckschwankungen in einer Pfeife lassen sich durch manometrische Flammen oder direkte Messungen auf verschiedene Weise nachweisen.

In Figur 36 sind die beiden ersten Hauptschwingungen transversaler Art eines an beiden Enden freien Stabes mit stark übertriebener Schwingungsamplitude dargestellt. Man hat sich den Stab etwa an elastischen Fäden aufgehängt und seitlich angeschlagen zu denken. Wichtiger sind die Eigenschwingungen eines an einem Ende festgeklemmten Stabes, von denen die drei ersten in Figur 37 gezeichnet sind. Jeder Teil schwingt wieder sinusförmig hin und her. Die Amplitudenkurven sind aber keine Sinuslinien. Die Knotenpunkte liegen nicht mehr gleich weit auseinander. Daher verhalten sich die Frequenzen von Grund- und Oberschwingungen auch nicht mehr wie 1:2:3... Der Zusammenklang ist für das Ohr nicht harmonisch wie bei der Saite und den longitudinalen Schwingungen. Die tiefsten Transversalschwingungen sind meist wesentlich tiefer als die tiefsten Longitudinalschwingungen desselben Stabes. Sie sind um so tiefer, je dünner der Stab ist, d. h. je leichter er sich biegen läßt. Wegen der großen Reaktionskräfte, die besonders bei dickeren Stäben an der Einspannstelle auftreten, ist es schwer, diese hinreichend massig und fest zu machen, ein Mitschwingen der Lagerung ist kaum zu vermeiden und entzieht dem Stab Schwingungsenergie, so daß er bald zur Ruhe kommt. Man kann dies vermeiden, indem man zwei gleiche Stäbe nebeneinander einspannt, so daß sie gegeneinander schwingen können und sich ihre Reaktionskräfte gegenseitig aufheben. Als eine Kombination zweier solcher Stäbe ist eine Stimmgabel (Fig. 38) zu betrachten. In Figur 39 sind die Grund- und erste Oberschwingung einer solchen Stimmgabel schematisch angegeben. Sind die Zinken mit dem Fuß gut befestigt, am besten aus einem einzigen Stück herausgearbeitet, braucht

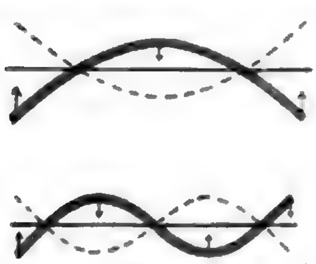


Fig. 36.

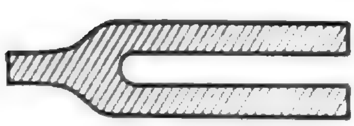


Fig. 38.

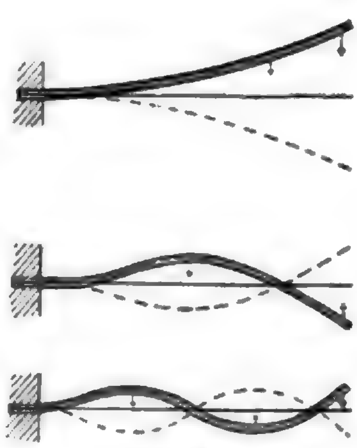


Fig. 37.

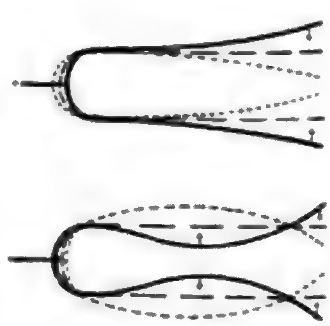


Fig. 39.

man den Fuß nicht weiter einzuspannen und erhält bei gutem Material ein außerordentlich wenig gedämpftes System. Man kann den schweren Zinken durch kräftiges Anschlagen eine große Schwingungsenergie mitteilen, von der nur ein ganz geringer Betrag durch Bewegung der umgebenden Luft verloren geht. Eine gute Stimmgabel kann minutenlang schwingen, also viele tausend Schwingungen ausführen, wenn sie, wie üblich, gegen 500 Schwingungen in der Sekunde macht. Da ihre Frequenz von äußeren Einflüssen so gut wie gar nicht abhängt, wird sie in der Musik zum Abstimmen benutzt. Der Normalton a hat 435 Schwingungen pro sec. Eine Stimmgabel mit dünnem Fuß (Fig. 40) kann man auch

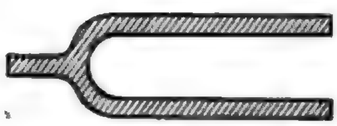


Fig. 40.

als gekrümmten Stab auffassen. Ein am Fuß befestigter Stiel schwingt daher longitudinal, wie dies aus Figur 39 hervorgeht.

Die Torsionshauptschwingungen von Stäben sind auch Sinusschwingungen, ebenso sind die Amplitudenkurven wie bei der Saite Sinuslinien. Die Knotenpunkte haben daher wieder gleiche Abstände und die Frequenzen verhalten sich wie 1:2:3... Sie sind etwa 1,6mal tiefer als die entsprechenden Frequenzen bei Longitudinalschwingungen. Sie bieten sonst nichts Neues, kommen auch selten allein für sich vor.

Wenn man einen Stab irgendwie anschlägt, so entstehen im allgemeinen Longitudinal-, Transversal- und Torsionsschwingungen gleichzeitig, jede mit ihrer unendlichen Reihe von Oberschwingungen. Die resultierende Schwingung ist also als Ueberlagerung aller dieser Schwingungen ein höchst komplizierter Vorgang. Zum Teil findet freilich eine Aussonderung zwischen diesen Schwingungen von selbst dadurch statt, daß ihre Dämpfungen verschieden sind, so daß nach kurzer Zeit nur die weniger gedämpften Eigenschwingungen übrig bleiben. Die höheren Schwingungen sind pro Zeiteinheit meist stärker gedämpft, da das Dekrement, d. i. die Dämpfung bezogen auf die Schwingungsdauer bei hohen und tiefen Schwingungen meist gleich groß ist. Bei einer Stimmgabel entstehen z. B. beim Anschlagen transversale Obertöne und auch longitudinale Schwingungen anfangs mit, doch schon nach kurzer Zeit ertönt der transversale Grundton ganz rein für sich, da die übrigen Töne rasch verklingen.

3c) **Membranen und Platten. Glocken.** Bei den zweidimensionalen Körpern unterscheidet man Membranen und Platten. Der Unterschied ist derselbe wie zwischen Saiten und Stäben. Erstere erhalten ihre elastischen Eigenschaften nur durch eine äußere Anspannung, so daß man diese Eigenschaften auch ohne weiteres ändern kann, letztere besitzen dagegen eine natürliche Steifigkeit, die vom Material und von der Dicke abhängt, bei einer bestimmten Platte also unveränderlich ist. Membranen werden wohl nur bei der Trommel und dem Tamburin benutzt, da es nicht ganz leicht ist, eine Membran gut einzuspannen. Schwingungen von Platten finden beim Telephon Verwendung, wo der schwingende Teil nicht ganz richtig als Membran bezeichnet wird; besonders aber bilden das Gong und die Glocke Beispiele für die Anwendung von Eigenschwingungen gekrümmter Platten. Die Theorie ergibt, daß auch hier wie bei der Saite sinusförmige Hauptschwingungen transversaler Art vorhanden sind, bei denen sich die Membran oder Platte in eine Anzahl Teile teilt, die in entgegengesetzter Richtung zueinander schwingen und durch Stellen völliger Ruhe voneinander getrennt sind, wie das in Figur 41 schematisch



Fig. 41.

angedeutet ist. Es entstehen hier statt der Knotenpunkte Knotenlinien. Die in Figur 41 gezeichnete rechteckige ebene Platte kann sich aber auch in der anderen, dazu senkrechten Richtung in Teile teilen und im allgemeinen werden sich beide Schwingungsformen überlagern. Dadurch erhalten die Knotenlinien eigentümliche Gestalten, wie sie in Figur 42 gezeichnet sind. Diese sogenannten Chladnischen Klangfiguren kann man auf ebenen Platten durch aufgestreuten Sand leicht erhalten, da dieser von den bewegten Teilen fortgeschleudert wird und sich in den Knotenlinien ansammelt. In Eigenschwingungen versetzt man die Platte am besten, indem man sie in einem möglichst eng begrenzten Punkte fest einspannt, eventuell auch an anderen Punkten mit dem Finger lose festhält und am Rande durch Streichen mit einem Violinbogen erregt. Durch die eingespannten und festgehaltenen Punkte bilden sich dann Knotenlinien aus, während durch die erregte Randstelle natürlich keine Knotenlinie gehen kann. Durch Verändern der Befestigungs- und Erregungsstellen kann man eine große Zahl

verschiedener hübscher Figuren erhalten, die mit den theoretisch errechneten gut übereinstimmen. Praktisch haben sie keine weitere Bedeutung.

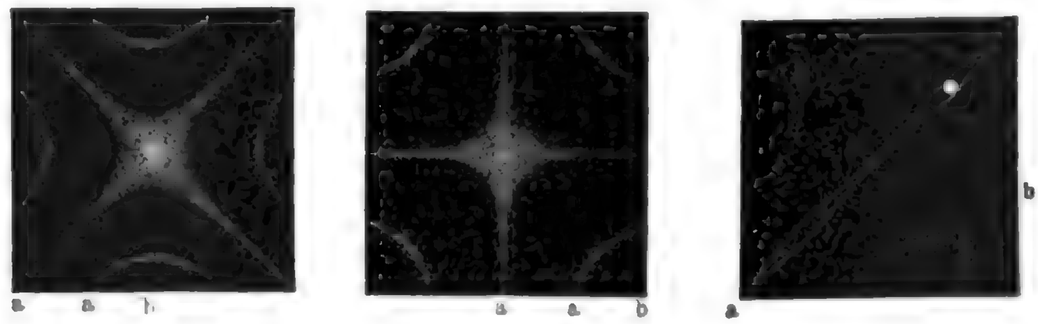


Fig. 42.

Bei der Grundschwingung von Glocken macht der Glockenrand die in Figur 43 gezeichnete Bewegung. Er teilt sich in 4 Teile, die abwechselnd nach außen und innen

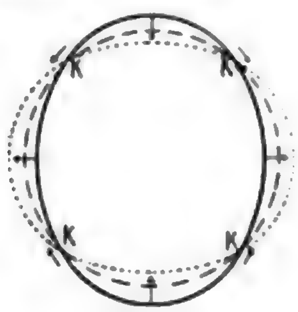


Fig. 43.

transversal schwingen. Die Knotenlinien KK schwingen dabei halb so stark longitudinal hin und her. Daher kann man ein Trinkglas nicht nur durch Anstreichen von innen nach außen, etwa mit einem Violinbogen, zum Tönen bringen, sondern auch dadurch, daß man mit dem nassen Finger längs des Randes herumfährt, also longitudinale Schwingungen erregt. Die Knotenlinien wandern dabei mit dem Finger im Kreise herum.

3d) Wasserwellen. Bei allen diesen Schwingungsbewegungen bildet die Elastizität die Kraft, die den Körper in seinen normalen, spannungslosen Zustand zurücktreibt. Bei den Wellen auf der Wasseroberfläche wirkt dagegen die Schwere als rücktreibende Kraft, die den normalen, ebenen Wasserspiegel herzustellen sucht. Wie die elastischen (Schall-) Wellen pflanzen sich auch die Wasserwellen längs der Wasseroberfläche fort und werden an festen Begrenzungen reflektiert. In geschlossenen Gefäßen entstehen daher ebenfalls stehende Wellen. In einem Wasserkübel schwingt das Wasser z. B. von einer Seite zur anderen, wenn man ihn ein wenig gekippt hat; und wenn man ihn schnell regelmäßig hin und her bewegt, kann man allerlei Formen von stehenden Wellen erhalten, die den Chladnischen Klangfiguren bei Platten entsprechen. Sie sind jedoch nicht mit ihnen gleich, schon weil die Wellenausbreitung im Wasser eine andere und z. B. bei verschiedener Wassertiefe verschiedenartig ist. Bei kurzen Wellen spielt ferner der Einfluß der Kapillarität wesentlich mit, der wie eine über die Oberfläche gespannte Membran wirkt und sich jeder Krümmung der Wasseroberfläche widersetzt. Bei großen Wellen von etwa 10 cm Länge an ist die Krümmung so klein (Fig. 44a), daß ihr Einfluß gegenüber dem der Schwerkraft verschwindet. Bei kurzen

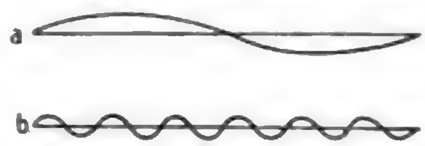
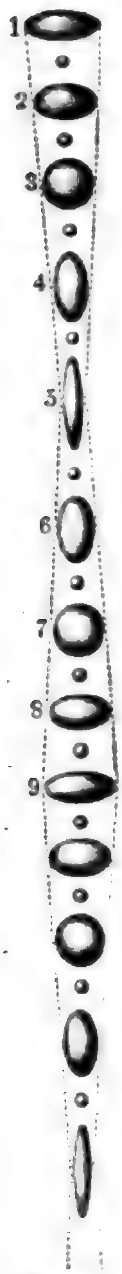


Fig. 44.

Wellen von wenigen Millimetern (Fig. 44b) ist umgekehrt der Einfluß der Kapillarität ausschlaggebend. — Unter dem Einfluß der Kapillarität machen auch fallende Wassertropfen schwingende Bewegungen, wie sie in Figur 45 dargestellt sind. Mittels Momentbeleuchtung, etwa durch einen elektrischen Funken oder durch eine photographische Momentaufnahme kann man sie gut beobachten.

4. Elektrische Schwingungen. Alles was hier für die mechanischen Systeme abgeleitet wurde, läßt sich vollständig auf die elektrischen Systeme übertragen. Zunächst besitzt auch jedes elektrische System streng genommen unendlich viele Freiheitsgrade und Eigenschwingungen, da jeder Teil, in dem Bewegung von Elektrizität erfolgt, ein elektrostatisches und magnetisches Feld, jeder Leiterteil Kapazität und Selbstinduktion im weiteren Sinne besitzt. Wenn aber an einer bestimmten Stelle eine große Selbstinduktion oder eine große Kapazität vorhanden ist, so kann man die Selbstinduktion oder Kapazität der übrigen Leitung dagegen

vernachlässigen, und erhält gerade wie bei dem gespannten Faden, der mit einer Kugel belastet war, im wesentlichen ein System mit nur einem Freiheitsgrade. Ist dagegen die Kapazität und Selbstinduktion gleichmäßig über den ganzen Leiter verteilt, so bildet jedes Stück für sich gleichsam einen kleinen Oszillator, der nur mit den Nachbarstücken gekoppelt ist. Die Verhältnisse liegen also vollkommen analog wie bei der Saite oder Pfeife und wir erhalten in der Tat genau dieselben Schwingungsformen.



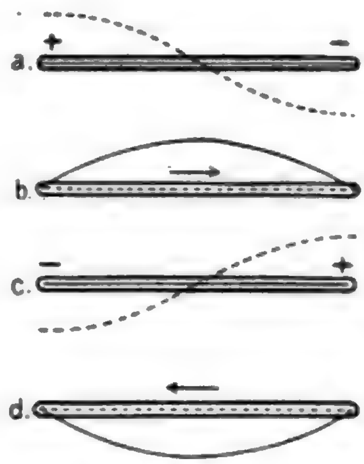


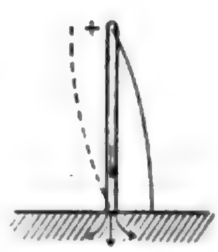
Fig. 46.



Fig. 47.



Fig. 48.



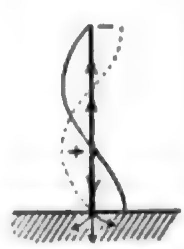


Fig. 45. Fig. 49. Fig. 50.

Für einen Stab, etwa einen beiderseits isolierten Draht, sind diese in den Figuren 46 bis 48 gezeichnet. Die ausgezogenen Kurven sollen die Größe der Stromstärke, die punktierten die der Spannung an den entsprechenden Stellen des Leiters zum Ausdruck bringen. Figur 46 stellt die Grundschwingung dar. Der Stab sei zunächst links positiv, rechts negativ geladen; der Strom sei Null (a). Diese Ladungen gleichen sich durch einen Strom von links nach rechts aus (b), der Strom hört aber dann nicht plötzlich auf, und läd beim Weiterfließen das rechte Ende positiv, das linke negativ, bis die dadurch entstehende gegenelektromotorische Kraft ihn zum Stillstand bringt (c). Dann entläd sich der Stab wieder wie zu Anfang, nur in entgegengesetzter Richtung (d), so daß sich der Zustand a wieder herstellt und der Vorgang von vorn beginnt. Der Strom und die Spannung ändern sich dabei an jeder Stelle des Drahtes sinusförmig mit der Zeit. Der Strom ist im Maximum, wenn die Spannung Null ist und umgekehrt. Die Amplitude der Aenderung ist beim Strom in der Mitte, bei der Spannung an den Enden am größten. Sie ändert sich auch örtlich längs des Drahtes sinusförmig, wie durch die ausgezogenen und punktierten Kurven angedeutet. In Figur 47 ist die erste, in Figur 48 die zweite Oberschwingung vereinfacht dargestellt. Der Leiter teilt sich auch hier in gleiche Teile, jeder schwingt für sich wieder in der Art der Grundschwingungen. Die Frequenzen verhalten sich daher wie 1:2:3 usw. Die Verhältnisse sind in jeder Beziehung identisch mit den Schwingungen einer beiderseits geschlossenen Pfeife, wenn man die Spannung mit dem Druck, die Ladung mit der Gasmasse, d. h. etwa die Elektronen mit den Gasmolekeln in Parallele setzt. Die Schwingungen sind longitudinal,[1]) man muß daher auch hier zwischen den Strom- und Spannungsknoten resp. -bäuchen unterscheiden. Am Ende des Leiters, wo der Strom nicht weiter fließen kann, liegt ein Stromknoten, also ein Spannungsbauch. Ein solches freies Ende entspricht einem geschlossenen Ende einer Pfeife. Man kann aber auch elektrisch ein „offenes Ende" und die diesem entsprechenden Schwingungen (Fig. 49 und 50) herstellen, indem man das Ende mit einer großen Leitermasse, am besten mit der leitenden Erdoberfläche selbst in Verbindung bringt; dann kann der Strom dort frei weiterfließen, ohne eine Gegenkraft zu erzeugen. Figur 49 ist die Grund-, Figur 50 die erste Oberschwingung. Man darf sich durch die Bezeichnungen nicht irre machen lassen: Ein

[1]) Die elektromagnetischen Wellen im Aether. z. B. die Lichtschwingungen sind transversal. Der Unterschied liegt darin, daß man dort die Feldstärke als schwingend betrachtet, während wir hier die Ladung, wenn man will, die Elektronen als im Leiter sich hin und her bewegend ansehen. Die Feldstärken im umgebenden Aether schwingen auch hier transversal.

elektrischer Stromkreis ist „geschlossen", wenn er den Strom ungehindert durchläßt, er ist „offen", wenn er den Strom absperrt; bei einer Pfeife benutzt man die Bezeichnungen wie bei einer Wasserleitung gerade im umgekehrten Sinne.

Man kann auch hier den Schwingungsvorgang nach der anderen Theorie als eine Fortpflanzung sich überlagernder Elementarwellen darstellen. Wir bekommen dadurch wie bei der Pfeife in einfacher Weise die Schwingungsdauer der Grundschwingung durch die Formel $T = \frac{2l}{v}$ für den beiderseits freien oder geerdeten Draht und $T = \frac{4l}{v}$ für den einerseits freien, andererseits geerdeten Draht. Für dünne, gut leitende Drähte oder so schnelle Schwingungen, daß der Strom ganz an der Oberfläche des Drahtes verläuft (Skineffekt), ist das elektromagnetische Feld im Innern des Drahtes zu vernachlässigen. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit v ist dann nichts anderes als die Lichtgeschwindigkeit, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Störungen des elektromagnetischen Feldes im Aether. Diese hat aber die ungeheure Größe von 3.10^{10} cm/sec = 300000 km/sec! Die elektrische Grundschwingung eines freien Stabes von 3 m Länge hat daher eine Schwingungsdauer von $T = \frac{2.300}{3.10^{10}} = 2.10^{-8}$ gleich eine fünfzigmillionstel Sekunde. Diese Theorie ist durch die Versuche von Hertz (1888) vollständig bestätigt und hat neuerdings eine wichtige praktische Anwendung in der drahtlosen Telegraphie gefunden.

Wird der geradlinige Draht umgebogen oder gar zu einer Spule aufgewickelt, so schwingt er doch im wesentlichen in derselben Art weiter, die Schwingungsdauer von Spulen weicht aber von der Formel $T = \frac{2l}{v}$ etwas ab und hängt von dem Verhältnis von Höhe zum Durchmesser der Spule ab. Die Grund- und Oberschwingungen stehen auch nicht mehr im Verhältnis von 1:2:3... (Drude).

Auch Kugeln geraten beim Ausgleich ihrer Ladungen durch einen Funken (Fig. 51)

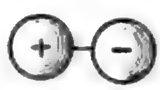


Fig. 51.

in Eigenschwingungen. Sie wurden von Righi zur Erzeugung sehr schneller Schwingungen benutzt, mit denen sich die optischen Versuche wie Brechung, Beugung und Polarisation der ausgesandten Wellen am leichtesten nachmachen lassen. Näheres s. in dem folgenden Artikel „Schwingungen".

V. Die Schwingungsdauer der häufigsten Schwingungen.

Zum Schluß noch einige allgemeine Bemerkungen über die Schwingungsdauer der am häufigsten vorkommenden Schwingungen.

1. Mechanische Schwingungen. Durch die Schwerkraft lassen sich stets nur sehr langsame Schwingungen herstellen. Ein Pendel von 1 m Länge hat rund 2 Sekunden Schwingungsdauer. Durch größere Länge oder dadurch, daß durch eine Masse M oberhalb des Drehpunktes D (Fig. 52) der Schwerpunkt nahe an den Drehpunkt verlegt wird, kann man praktisch etwa auf 10 bis 20 Sekunden kommen. Die schnellsten Schwingungen dürften $^1/_{10}$ Sekunde nicht unterschreiten. In dem gleichen Bereiche liegen auch die Schwingungen von schwimmenden Körpern und von Flüssigkeiten in Rohren oder Kübeln. Die Schwerkraftsschwingungen umfassen daher nur einen engen Bereich. Sie sind fast stets mit dem Auge in ihren einzelnen Phasen zu verfolgen und eignen sich aus diesem Grunde besonders zum Studium des Schwingungsverlaufes. Sie hängen nur von der räumlichen Konfiguration des Systems, nicht vom spezifischen Gewicht oder sonstigen Materialeigenschaften ab, da bei höherem spezifischen Gewichte die Trägheit um ebensoviel zunimmt wie die Schwerkraft. Das Gewicht des Pendels hat auf die Schwingungsdauer keinen Einfluß, ebenso ist die Ausbreitung von Schwerkraftwellen im Quecksilber dieselbe wie im Wasser.



Fig. 52.

Durch besondere Mittel lassen sich auch mit elastischen Kräften sehr langsame Schwingungen herstellen, am besten wohl durch Torsionsschwingungen, indem man eine Scheibe von großer Trägheit in der Mitte an einem möglichst dünnen Draht aufhängt. Gewisse „100 Tage gehende" Uhren benutzen solche Schwingungen an Stelle des Pendels. 10 bis 20 Sekunden dürfte hier auch wohl die normale obere Grenze sein. So langsame Schwingungen erhält man aber nur, wenn man möglichst nachgiebige, d. h. dünne, leichte Federn auf besondere, große Massen wirken läßt, also typische Schwingungen mit einem Freiheitsgrade künstlich herstellt. Die „natürlichen" elastischen Schwingungen, bei denen dieselben Teile Masse und Elastizität zugleich liefern, haben stets eine viel

kürzere Schwingungsdauer. Wir finden sie am einfachsten aus der Formel für stehende Wellen $T = \frac{2l}{v}$, in der v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Wellen in dem betreffenden Medium ist. Diese ist nur für Gummi, Kautschuk u. dgl. nachgiebige und doch schwere Körper klein. In Luft beträgt sie 340 m/sec, in festen Körpern, Metallen, Holz, Glas usw. ist sie für longitudinale Wellen durchwegs über 1000 m/sec. Für Biegungsschwingungen ist sie kleiner, aber der Unterschied ist nicht groß, so lange es sich nicht um extrem dünne Körper handelt. Daraus folgt, daß die Frequenzen der natürlichen Grundschwingungen von Körpern, deren Dimensionen zwischen 10 cm und 1 m liegen, in der Gegend zwischen 2500 und 250 Schwingungen pro Sekunde liegen, wenn wir im Mittel $v = 500$ m/sec setzen. Schwingungen von diesen und etwas höheren Perioden — es werden auch die ersten Oberschwingungen mit erregt — entstehen praktisch bei jedem Stoß, bei jeder Reibung, kurz so ziemlich bei jeder Bewegung in der Natur, die für uns Interesse hat. Mit dem Auge sind diese Schwingungen nicht mehr verfolgbar, wohl aber mit dem Ohre, wenn auch allerdings nicht in ihren einzelnen Phasen. Es dürfte kein Zufall sein, daß die Empfindlichkeit unseres Ohres gerade in dieses selbe Bereich fällt. Das Ohr ist nämlich für Töne von etwa 800 Schwingungen am empfindlichsten und für andere Töne um so unempfindlicher, je mehr die Frequenz nach unten oder oben von dieser Zahl abweicht. Die Grenze des Hörens überhaupt liegt etwa zwischen 16 und 30000 Perioden. Wir sind also für Töne um so empfindlicher, je häufiger sie in der Natur vorkommen, was man wohl zweifellos als eine Art Anpassung betrachten darf.

2. Elektrische Schwingungen. Die elektrischen Eigenschwingungen verlaufen im allgemeinen ganz außerordentlich viel schneller. Es ist zwar auch hier möglich, den Verlauf künstlich zu verlangsamen und man hat gelegentlich durch außerordentlich große Kapazitäten und Selbstinduktionen (große Spulen von vielen tausend Windungen) elektrische Eigenschwingungen von über 6 Sekunden Schwingungsdauer hergestellt, bei denen man das Hin- und Herfließen des Stromes direkt an dem entsprechenden wechselnden Ausschlag eines eingeschalteten Amperemeters beobachten konnte. Aber schon die normalen Entladungen einer Leydener Flasche durch den Funken ergeben meist eine Million und mehr Schwingungen in der Sekunde. Für lineare Oszillatoren und überhaupt für solche Leiter, bei denen Selbstinduktion und Kapazität gleichmäßig über den ganzen Leiter verteilt sind, gibt wieder die Formel $T = \frac{2l}{v}$ die beste Abschätzung. Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $v = 300000$ km/sec etwa eine Million mal größer ist als bei mechanischen Wellen, so sind die leicht erzielbaren elektrischen Eigenschwingungen in gleichem Maße schneller. Die schnellsten, durch Funkenentladungen winziger Oszillatoren hergestellten Eigenschwingungen machten 10^{11}, d. h. 100000 Millionen Schwingungen pro Sekunde. Der Frequenzbereich der elektrisch herstellbaren Schwingungen ist also ungeheuer groß. Doch taugt keiner unserer Sinne dazu, solche direkt wahrzunehmen.

Noch ganz wesentlich schnellere Eigenschwingungen sind es, die die Elektronen in den Molekülen ausführen. Von diesen erhalten wir durch das Licht und unser Auge Kunde, so wie uns der Schall und unser Ohr die elastisch-mechanischen Schwingungen anzeigte. Auch das Auge hat sich den für uns wichtigsten und in der Natur am häufigsten vorkommenden elektrischen Schwingungen angepaßt; das sind natürlich nicht die Schwingungen von Drähten, die wir ja erst seit wenigen Jahrzehnten künstlich zu erzeugen gelernt haben, sondern die molekularen Schwingungen, die durch Resonanz mit dem auftreffenden Sonnenlicht entstehen und die allen Körpern ihre charakteristische Farbe und Helligkeit verleihen. Die Empfindlichkeit des Auges fällt nahezu in den Bereich, in dem das Maximum der Energie der zu uns gelangenden Sonnenstrahlen liegt, nämlich auf 4 bis 8×10^{14}, d. h. 400 bis 800 Billionen Schwingungen pro Sekunde. Der Bereich des Auges ist ganz wesentlich enger als der des Ohres, so daß uns die ultraroten und ultravioletten Eigenschwingungen, die in der Natur noch merklich vorhanden sind, entgehen.

Beim Verdampfen der Körper durch hohe Temperaturen oder elektrische Entladungen erregt man oft sehr gleichmäßige molekulare Eigenschwingungen. Natriumdampf in einer Bunsenflamme schwingt z. B. sehr rein in einer Sinusschwingung von rund 500 Billionen Schwingungen pro Sekunde. Andere Körper besitzen wieder ganze Serien von Eigenschwingungen, die etwa den Grund- und Oberschwingungen entsprechen, wie wir aus dem Studium ihrer komplizierten Spektren erfahren. Doch sind hier die Verhältnisse noch nicht geklärt und ein näheres Eingehen würde uns zu weit führen (vgl. den Artikel „Spektroskopie").

Literatur. ***Winkelmann***, *Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. II, Akustik von F. Auerbach, 1909 (enthält auch sehr ausführliche Literaturangaben).*

— *In den übrigen Physikbüchern die Kapitel über Akustik.* — **E. Chladni,** *Entdeckungen über die Theorie des Klanges. Leipzig 1787.* — **Derselbe,** *Die Akustik. Leipzig 1802.* — **Derselbe,** *Kurze Uebersicht über die Schall- und Klanglehre. Mainz 1827.* — **A. Seebeck,** *Akustik. Berlin 1849.* — **J. Tyndall,** *Der Schall. Deutsch von Helmholtz und Wiedemann. 2. Aufl. Braunschweig 1874.* — **F. Melde,** *Akustik. Leipzig 1888.* — **Lord Rayleigh,** *Die Theorie des Schalls. Uebersetzt von F. Neesen. Braunschweig 1880.* — **H. v. Helmholtz,** *Die Lehre von den Tonempfindungen. Braunschweig 1870 (Neue Auflage).* — **Derselbe,** *Vorlesungen über die mathematischen Prinzipien der Akustik. Herausgegeben von König und Runge. Leipzig 1898.* — **J. Zenneck,** *Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie. Stuttgart 1905.* — **W. Hort,** *Technische Schwingungslehre. Berlin 1910.* — **M. Wien,** *Annalen der Physik, 61, 151, 1897 (Gekoppelte Systeme).* — **W. Thomson,** *Phil. Mag. (4), 5, 393, 1855 (Kondensatorentladungen).*

H. Barkhausen.

Schwingungen.

Elektrische Schwingungen und drahtlose Telegraphie.

A. Mechanische und elektrische Schwingungen.

Die Tatsachen und Gesetze der elektrischen Schwingungen sind den Tatsachen und Gesetzen völlig analog, die wir an mechanischen Schwingungen auf Schritt und Tritt zu beobachten in der Lage sind. Hierauf wird auch in den Artikeln „Schwingende Bewegung", „Schwingende Systeme", „Schwingungserregung", „Erzwungene Schwingungen" ausgiebig hingewiesen. Die Schwingungen mechanischer Systeme sollen daher im folgenden stets zur Veranschaulichung herangezogen werden.

I. Mechanische Systeme.

Als ein mechanisches System bezeichnen wir jede Anordnung greifbarer Materie, die als einheitlicher und stabiler Ausschnitt aus der Welt der greifbaren Materie sich unseren Sinnen unmittelbar darstellt oder mittelbar durch einen Denkprozeß darstellen läßt. So sprechen wir von Körpern, Körpersystemen, Planetensystemen; von Atomen, Molekülen, Molekülsystemen usw.

In Wirklichkeit ist die Welt als Ganzes eine Einheit, und es gibt kein System, welches nicht mit der übrigen Welt in Wechselwirkung, d. h. in Energieaustausch stände. Häufig aber ist dieser Austausch so klein oder er kann so klein gemacht werden, daß er für die physikalische Betrachtungsweise als nicht vorhanden gelten darf, und daß das betreffende System praktisch als abgeschlossenes, für sich existierendes angesehen werden kann.

Immer nun, wenn uns solche abgeschlossenen mechanischen Systeme begegnen, erscheint als eine ihrer allgemeinsten Eigenschaften diejenige, daß sie schwingungsfähig sind, d. h. daß die Anordnung der Materie in ihnen mit der Zeit periodische Abweichungen von der normalen erfahren kann. Es sei nur erinnert an alles, was Pendel heißt; oder an alles, was durch einen Ton von seinem Schwingungszustande Kunde gibt; an Ebbe und Flut, an das gewaltige Schwingen der Planeten auf ihrer Bahn um die Sonne u. dgl. m. (vgl. den Artikel „Schwingende Systeme").

Die Schwingungsfähigkeit der mechanischen Systeme beruht auf zwei universellen Eigenschaften; wir wollen sie Anordnungsstabilität und Geschwindigkeitsstabilität nennen.

1. Anordnungsstabilität. Mit Anordnungsstabilität der Körper oder Körpersysteme soll die Tatsache bezeichnet sein, daß sie sich einer Aenderung in der Anordnung ihrer Teile oder Teilchen mit einer Kraft widersetzen, die wir Formänderungswiderstand nennen wollen. Die Anordnung der Teilchen eines Körpers oder der Teile eines Körpersystems kann nur durch einen gegen diesen Formänderungswiderstand gesetzten Zwang (Kraft) verändert werden. Die Ueberführung in eine neue Anordnung bedeutet, daß ein äußerer Zwang mit dem Formänderungswiderstand in Arbeitsbeziehung tritt. Wirkt der Zwang gegen den Formänderungswiderstand, so gibt er bei der Formänderung Arbeit an den Körper oder das Körpersystem ab. Diese Arbeit erscheint als Anordnungsenergie (potentielle Energie) in dem Körper aufgespeichert. Sie wird ihm unter Herstellung der ursprünglichen Anordnung wieder entzogen, wenn der Formänderungswiderstand gegen den äußeren Zwang Arbeit zu leisten imstande ist.

Die Formänderung läßt sich durch eine in jedem Fall zweckmäßig zu wählende Größe $\mathfrak{f}$ messen. Sie kann positiv und negativ sein. Beschränkt man sich auf kleine Formänderungen, so ergibt sich stets, daß der Formänderungswiderstand

$$\mathfrak{W}_F = \mathfrak{D}\mathfrak{f} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 1)$$

d. h. daß er der Größe der Formänderung proportional ist. Die Größe $\mathfrak{D}$ ist jener Formänderungswiderstand, den das System entwickelt, wenn seine Anordnung um die Einheit von $\mathfrak{f}$ geändert wird; sie soll Direktionsmoment genannt sein und ist das Maß der Anordnungsstabilität des Systems gegenüber der betrachteten Formänderung. Die Anordnungsenergie, die einem System durch die Formänderung $\mathfrak{f}$ erteilt wird, ist

$$W_F = \frac{1}{2}\mathfrak{D}\mathfrak{f}^2 \quad \ldots \ldots \quad 2)$$

2. Geschwindigkeitsstabilität. Mit Geschwindigkeitsstabilität eines mechanischen Systems soll die Tatsache bezeichnet sein, daß es sich einer Geschwindigkeitsänderung seiner Massen durch Entwickelung einer Kraft widersetzt, die wir Trägheitswiderstand $\mathfrak{W}_T$ nennen; ihre Geschwindigkeit kann nur durch einen gegen diesen Trägheitswiderstand gesetzten Zwang (Kraft) verändert werden. Die Ueberführung eines Systems in einen anderen Geschwindigkeitszustand bedeutet, daß ein äußerer Zwang mit dem Trägheitswiderstand in Arbeitsbeziehung tritt. Wirkt der Zwang gegen den Trägheitswiderstand, so gibt er Arbeit an das System ab, die als Bewegungsenergie (kinetische Energie) in dem System aufgespeichert erscheint. Sie wird ihm unter Verkleinerung der Geschwindigkeiten wieder entzogen, wenn der Trägheitswiderstand gegen den äußeren Zwang Arbeit zu leisten in der Lage ist.

Handelt es sich um Bewegungen in dem System, die zu einer durch $\mathfrak{f}$ meßbaren Formänderung gehören, so gilt stets

$$\mathfrak{W}_T = \mathfrak{M}\frac{\mathfrak{d}^2\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t^2} \quad \ldots \ldots \quad 3)$$

d. h. der Trägheitswiderstand ist der zeitlichen Aenderung der Deformationsgeschwindigkeit $\mathfrak{v} = \frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}$ proportional.

Der Faktor $\mathfrak{M}$ ist der Trägheitswiderstand, den der Körper entwickelt, falls seine Deformationsgeschwindigkeit in der Sekunde um die Einheit des gewählten Maßes geändert wird. Er heißt Massenmoment und ist das Maß der Geschwindigkeitsstabilität des Systems gegenüber der betrachteten Geschwindigkeitsänderung.

Die Bewegungsenergie, die einem Körper durch eine Deformationsgeschwindigkeit $\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}$ innewohnt, ergibt sich zu

$$W_T = \frac{1}{2}\mathfrak{M}\left(\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}\right)^2 \quad \ldots \ldots \quad 4)$$

3. Schwingungen mechanischer Systeme. Wir wollen uns jetzt ein System durch einen äußeren Zwang deformiert, also einen gewissen Betrag von Anordnungsenergie

in ihm aufgespeichert denken. Wird dann plötzlich der Formänderungszwang weggenommen, so schicken sich die Teile des Systems an, in die alte Anordnung zurückzukehren. Da sich ihnen dabei kein äußerer Zwang entgegenstellt, so kann sich die freiwerdende Anordnungsenergie nach dem Energieprinzipe nicht anders betätigen, als daß sie den in die alte Anordnung zurückkehrenden Systemteilen Geschwindigkeit erteilt. Sind sie in der alten Anordnung angekommen, so haben sie den ganzen Betrag der ursprünglich aufgespeicherten Anordnungsenergie in Form von Bewegungsenergie aufgenommen. Sie können daher nicht in der wiedergewonnenen Anordnung verharren, sondern streben darüber hinaus zu einer neuen Formänderung entgegengesetzter Art. Sie machen darin erst Halt, wenn sie die ganze Bewegungsenergie wieder zur Herstellung einer Formänderung entgegengesetzten Vorzeichens verbraucht haben. Nun muß sich das Spiel im umgekehrten Sinne wiederholen; kurz, das System muß zwischen zwei entgegengesetzten Anordnungszuständen in alle Ewigkeit hin und her schwingen. Praktisch stellt sich allerdings jeder Bewegung des Systems ein mehr oder weniger großer Reibungs- oder sonstiger äußerer Zwang entgegen, der dem System Energie entzieht, so daß die Schwingung nach längerer oder kürzerer Zeit verklingt.

4. **Charakteristische Eigenschaften der mechanischen Schwingungen.** 4a) Schwingungszeit, Schwingungszahl, Kreisfrequenz. Die Schwingungszeit T ist die Zeit, die zu einem vollständigen Hin- und Hergang, einer sogenannten Periode, der Schwingung erfordert wird. $\frac{1}{T} = n$ ist dann die Schwingungszahl, die Zahl der Schwingungsperioden in einer Sekunde; $\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T}$ ist die Zahl der Schwingungsperioden in 2π Sekunden, die sogenannte Kreisfrequenz.

4b) Schwingungsform. Sie wird bestimmt durch den besonderen Verlauf der periodischen Funktion F (t), nach der die Formänderung f mit der Zeit wechselt. Nach dem Fourierschen Theorem läßt sich jede periodische Funktion als Reihe einfach harmonischer, sinus- oder kosinusförmiger Funktionen verschiedener Schwingungszahlen auffassen (vgl. den Artikel „Fouriersches Theorem"). Daraus ist zu schließen, daß die Schwingungsform eines mechanischen Systems dadurch bestimmt ist, daß es eine entsprechende Anzahl von einfach-harmonischen Schwingungen verschiedener Schwingungszahl machen kann, deren jeweilige Kombination die Schwingungsform bestimmt. Dies trifft in der Tat zu, und durch geeignete Erregung läßt sich auch jede dieser einfachen Schwingungen, der sogenannten Eigenschwingungen, für sich herstellen. Für jede derselben gilt

$$\mathfrak{f}_p = \mathfrak{F}_p \cos\omega_p t = \mathfrak{F}_p \cos p\omega_1 t \quad \ldots \quad 5)$$
$$p = 1, 2, 3 \ldots$$

wo $\omega_p = p\omega_1$ die Kreisfrequenz ist. Die Schwingung größter Schwingungszahl (p=1), die das System machen kann, heißt die Grundschwingung, die anderen (p>1) heißen die Oberschwingungen. Die Reihe der möglichen Schwingungen ist von der besonderen Form und Anordnung des Systems bestimmt und für das System charakteristisch.

4c) Schwingungsweite. So heißt die Größe $\mathfrak{F}_p$, welche die Grenzen bestimmt, zwischen denen die Gestalt oder Anordnung des Körpers oder Körpersystems bei der betreffenden Schwingung hin und her schwankt. Sie wird durch den Betrag der Energie bestimmt, die bei der Erregung der Schwingung dem System zugeführt wurde.

4d) Dämpfung. Da es keine völlig abgeschlossenen Systeme gibt, so wird, wie schon erwähnt, dauernd Schwingungsenergie, z. B. durch Reibung, verloren. Infolgedessen bleibt die Schwingungsweite nicht konstant $\mathfrak{F}_p$, sondern sie nimmt mit der Zeit ab, die Schwingung wird „gedämpft". Der häufigste Fall ist der, daß die in einer unendlich kleinen Zeitspanne dt pro Zeiteinheit verlorene Energie immer derselbe Bruchteil der zu Beginn der Zeitspanne vorhandenen Energie ist. D. h. daß z. B.

$$\frac{d(\frac{1}{2}\mathfrak{D}\mathfrak{f}^2)}{dt}\,\frac{1}{\frac{1}{2}\mathfrak{D}\mathfrak{f}^2} = 2\delta \quad . \; . \; . \quad 6)$$

ist. Daraus folgt

$$\frac{d\mathfrak{f}}{\mathfrak{f}} = \delta dt \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 6a)$$

Wenn man von einem Maximum $\mathfrak{F}'$ ausgehend bis zum T Sekunden später erreichten Maximum $\mathfrak{F}''$ integriert, also

$$\int_{\mathfrak{F}'}^{\mathfrak{F}''} \frac{d\mathfrak{f}}{\mathfrak{f}} = \delta \int_{t'}^{t'+T} dt$$

bildet, so wird

$$\lg \frac{\mathfrak{F}''}{\mathfrak{F}'} = \delta T = \lg k \quad . \; . \; . \; . \quad 7)$$

oder

$$\frac{\mathfrak{F}''}{\mathfrak{F}'} = \varepsilon^{\delta T} = \varepsilon^{\mathfrak{d}} = k \quad . \; . \; . \; . \quad 8)$$

($\varepsilon = 2{,}71828 \ldots$ die Basis der natürlichen Logarithmen). δ heißt der Dämpfungsfaktor, k das Dämpfungsverhältnis, $\mathfrak{d} = \lg k$ das logarithmische Dekrement. Aus diesen Beziehungen folgt, daß in dem genannten Falle die Schwingungen nach dem Gesetze verlaufen

$$\mathfrak{f}_p = \mathfrak{F}_p\, \varepsilon^{-\delta_p t} \cos \omega_p t$$

$$= \mathfrak{F}_p\, \varepsilon^{-\mathfrak{d}_p \frac{t}{T}} \cos \omega_p t = \mathfrak{F}_p\, \varepsilon^{-\mathfrak{d}_p z} \cos \omega_p t \quad 9)$$

Hier ist $z = \frac{t}{T}$ die Zahl der seit Beginn erfolgten Schwingungen. $\frac{1}{\delta}$ ist die Zahl der Sekunden, $\frac{1}{\mathfrak{d}}$ die Zahl der Perioden, die ablaufen, bis die Schwingungsweite auf $\frac{1}{\varepsilon}$ ihres Anfangswertes $\mathfrak{F}_p$ abgedämpft ist.

Figur 1 zeigt das Wellendiagram zweier Schwingungen verschiedener Frequenz, aber gleichen Dämpfungsfaktors δ, wenn als Abszisse die Zeit gewählt wird. Figur 2 dasselbe für dieselben Schwingungen, wenn als Abszisse die Periodenzahl z dient. Figur 3 gibt die Amplitudenkurven in beiden Fällen für verschiedene δ und $\mathfrak{d}$ Werte an.

Erfolgt z. B. die Dämpfung durch Reibung, wirkt also eine Reibungskraft $\mathfrak{R}\,\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}$, so ist die von der Reibungskraft bei der Schwingungsbewegung geleistete Sekundenarbeit

$$\mathfrak{R}\left(\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}\right)^2 = \mathfrak{R}\mathfrak{v}^2 = \mathfrak{R}\mathfrak{B}^2 \sin^2 \omega t \quad . \; . \; . \; . \; 10)$$

Das ergibt die mittlere Sekundenarbeit während einer Periode

$$\frac{1}{T}\int_0^T \mathfrak{R}\mathfrak{B}^2 \sin^2 \omega t\, dt = \frac{1}{2}\, \mathfrak{R}\mathfrak{B}^2 \quad . \; . \; . \; 11)$$

die als Reibungswärme verloren geht. Andererseits ist die Energie, die bei der Amplitude $\mathfrak{B}$

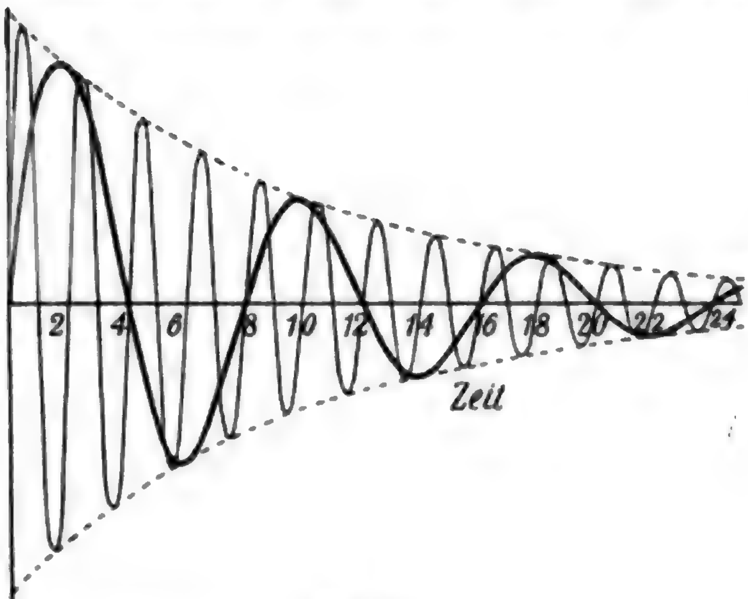


Fig. 1.*

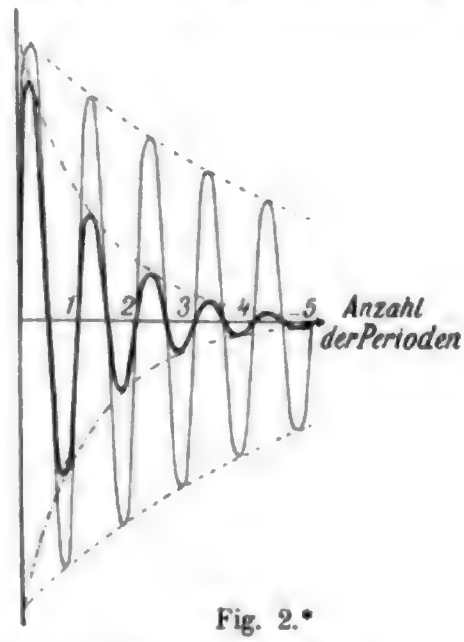
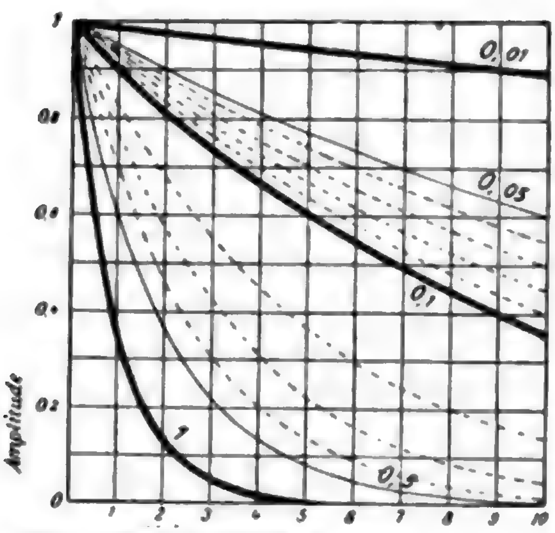


Fig. 2.*



Für $\mathfrak{d}$ Anzahl der Perioden
Für δ Anzahl der Sekunden

Fig. 3.*

der Deformationsgeschwindigkeit vorhanden ist $\frac{1}{2}\,\mathfrak{M}\mathfrak{B}^2$. Daher ist (analog der Gleichung 6)

$$2\delta = \frac{{}^1\!/_2\,\mathfrak{R}\mathfrak{B}^2}{{}^1\!/_2\,\mathfrak{M}\mathfrak{B}^2} \text{ oder } \delta = \frac{\mathfrak{R}}{2\mathfrak{M}} \quad . \; . \; . \; 12)$$

und

$$\mathfrak{d} = \frac{\mathfrak{R}}{2\mathfrak{M}}\, T = \frac{{}^1\!/_2\,\mathfrak{R}\mathfrak{B}^2 T}{2 \times {}^1\!/_2\,\mathfrak{M}\mathfrak{B}^2} \quad . \; . \; 13)$$

$\mathfrak{d}$ mißt also den Bruchteil der in jeder Periode umgesetzten Energie, der in Reibungswärme verwandelt wird.

4e) Schwingungsformel. Die Schwingungszeit ist bei verschwindender Dämpfung durch die Größen $\mathfrak{M}$ und $\mathfrak{D}$ nach der Beziehung

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{D}}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 14)$$

bestimmt.

*) Die mit * bezeichneten Figuren sind dem Werke von J. Zenneck, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie (Stuttgart 1913) entnommen.

Das läßt sich elementar folgendermaßen ersehen: Die Summe der potentiellen und kinetischen Energie ist bei dem ungedämpft schwingenden System konstant, also

$$\frac{1}{2}\mathfrak{M}\left(\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}\right)^2 + \frac{1}{2}\mathfrak{D}\mathfrak{f}^2 = \text{konst.}$$

oder wenn man die Aenderung bestimmt, die dieser Energiegehalt in der Zeiteinheit erfährt, d. h. wenn man nach der Zeit differenziert

$$\mathfrak{M}\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}\frac{\mathfrak{d}^2\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t^2} + \mathfrak{D}\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t}\mathfrak{f} = 0$$

also

$$\frac{\mathfrak{d}^2\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t^2} + \frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{M}}\mathfrak{f} = 0 \quad \ldots\ldots \quad 15)$$

Die Schwingung vollzieht sich nach dem Gesetz $\mathfrak{f} = \mathfrak{F}\cos\omega t$, also ist

$$\frac{\mathfrak{d}\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t} = -\mathfrak{F}\omega\sin\omega t;\ \frac{\mathfrak{d}^2\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t^2} = -\mathfrak{F}\omega^2\cos\omega t.$$

Es gilt somit

$$\frac{\mathfrak{d}^2\mathfrak{f}}{\mathfrak{d}t^2} + \omega^2\mathfrak{f} = 0 \quad \ldots\ldots \quad 16)$$

Diese Gleichung stimmt mit (15) überein, wenn

$$\omega = 2\pi n = \frac{2\pi}{T_0} = \sqrt{\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{M}}} \quad \ldots\ldots \quad 14a)$$

oder

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{D}}}$$

ist.

Kann die Dämpfung nicht vernachlässigt werden, so gilt statt (14)

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{D}} - \delta^2} \quad \ldots \quad 14b)$$

wofür mit genügender Annäherung

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{D}}}\sqrt{1+\left(\frac{\mathfrak{d}}{2\pi}\right)^2} = T_0\sqrt{1+\left(\frac{\mathfrak{d}}{2\pi}\right)^2} \quad 14c)$$

esetzt werden kann.

Da, wie oben gesagt, jedes System eine große Anzahl von Schwingungen mit verschiedener Schwingungszeit machen kann, so muß nach der Beziehung (14) zu jeder möglichen Schwingung auch ein besonderes Massenmoment $\mathfrak{M}_p$ und Direktionsmoment $\mathfrak{D}_p$ gehören. Zu jeder Schwingung nämlich dasjenige Direktionsmoment, welches durch die der betreffenden Schwingung eigentümliche Formänderung geweckt wird, und dasjenige Massenmoment, welches sich durch die der betreffenden Schwingung eigentümliche Bewegung der einzelnen Teile des Systems bildet. Nun kann ja im Grunde das System unendlich viele Formänderungen erfahren, also a priori, von einer gewissen Schwingungszahl aufwärts, Schwingungen jeder Schwingungszahl ausführen. Die Erfahrung aber zeigt, und die theoretische Analyse bestätigt, daß sich bei dem Versuche, irgendwelche beliebige Schwingung zu erregen, stets ein Ausleseprozeß vollzieht, der nur bestimmte Schwingungen bestehen läßt, die dem System als Grund- oder Oberschwingung eigentümlich sind. Das kommt daher, daß die einzelnen Teile eines geschlossenen Systems in Energieverkehr stehen, miteinander gekoppelt sind. Die wellenförmig zirkulierende und an den Grenzen des Systems reflektierte Schwingungsenergie muß sich dann durch Interferenz naturnotwendig auf die Reihe der sogenannten Haupt- oder Eigenschwingungen verteilen, die durch die besondere Form oder Anordnung des Systems vorgeschrieben sind. Man nennt die Zahl der Schwingungsmöglichkeiten auch wohl die Zahl der Freiheitsgrade des Systems. In einfacheren Fällen läßt sich die Reihe dieser Schwingungen mit ihren zugehörigen $\mathfrak{M}_p$ und $\mathfrak{D}_p$ Werten in Beziehung zu den geometrischen Verhältnissen exakt ausdrücken.

5. **Beispiele.** 5a) Das mathematische Pendel (bei sehr kleinen Ausschlägen). Bei ihm schwingt die in der Pendelkugel vereinigte Masse, so daß das Massenmoment $\mathfrak{M}$ direkt mit der Masse m identisch wird. Als Maß der Formänderung dient die Verrückung $\mathfrak{a}$ des Pendelmassenpunktes aus der Ruhelage. Dann ist $\mathfrak{W}_{\mathfrak{F}} = \frac{mg}{l}\mathfrak{a}$, wo l die Pendellänge, g die Beschleunigung der Schwere ist. Also ist $\mathfrak{D} = \frac{mg}{l}$, und die durch eine Verrückung $\mathfrak{a}$ aufgespeicherte Energie ist $\frac{1}{2}\frac{mg}{l}\mathfrak{a}^2$. Die kinetische Energie bei der Geschwindigkeit $\mathfrak{v} = \frac{d\mathfrak{a}}{dt}$ ist $\frac{1}{2}m\mathfrak{v}^2$. Die Schwingungszeit

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{ml}{mg}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad \ldots\ldots \quad 17)$$

Diese Schwingung ist die einzige, die das mathematische Pendel machen kann, es besitzt nur diesen einen Freiheitsgrad. Das wird beim physischen Pendel sogleich anders, wo außer der eigentlichen Pendelschwingung auch elastische Schwingungen des Pendelkörpers möglich sind.

5b) Schwingungen von Luftsäulen. Während das System „mathematisches Pendel" durch seine Konzentration der Massen in einen Punkt das eine Extrem der Möglichkeiten darstellt, ist das System „schwingende Luftsäule" durch seine gleichmäßige Verteilung der Massenteilchen längs eines Zylinders das entgegengesetzte Extrem. Die Schwingungen, die bei ihm möglich sind, zeigt Figur 4. Die ausgezogenen Amplitudenkurven der Geschwindigkeitsverteilung stellen die Verteilung der kinetischen Energie, die gestrichelten Amplitudenkurven der Druckschwankung (Spannung) die Verteilung der potentiellen Energie auf dem

Luftvolumen nach „Knoten" und „Bäuchen" dar. Als Maß der Formänderung wird die Momentanspannung $\mathfrak{f}_b$ im Bauche der

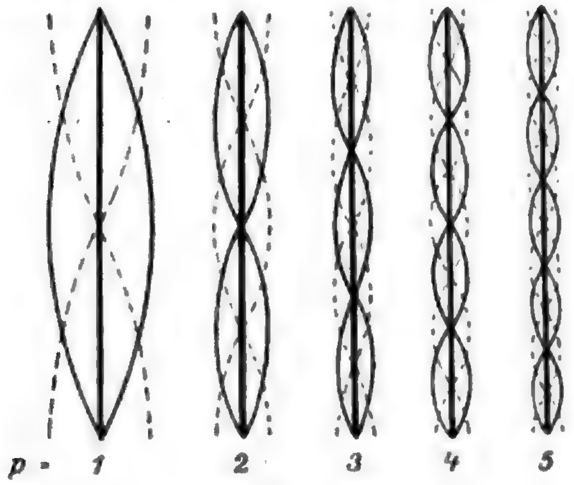


Fig. 4.

Schwingung gewählt; die Spannungen $\mathfrak{f}_x$ an anderen Stellen stehen zu $\mathfrak{f}_b$ in der Beziehung

$$\mathfrak{f}_x = \mathfrak{f}_b \cos \frac{2\pi}{\lambda_p} x \quad . \; . \; . \; . \; . \; 18)$$

wo x der Abstand vom Ende der Luftsäule, λ_p der Abstand eines Knoten vom übernächsten (Wellenlänge) ist. Hier treten neben der Grundschwingung $(p = 1)$ die Oberschwingungen $(p = 2, 3 \ldots)$ in der Weise auf, daß jede Hälfte, jedes Drittel, jedes Viertel, jedes p-tel der Luftsäule gewissermaßen für sich ein eigenes Schwingungssystem wird. Dabei wird für jeden p-ten Teil das Direktionsmoment $\mathfrak{D}_p$ p-mal größer als das Direktionsmoment $\mathfrak{D}_1$ der Grundschwingung, während das Massenmoment $\mathfrak{M}_p$ p-mal kleiner wird wie $\mathfrak{M}_1$. So ergeben sich die Schwingungszeiten der Eigenschwingungen zu

$$T_p = \frac{2\pi}{p} \sqrt{\frac{\mathfrak{M}_1}{\mathfrak{D}_1}} \quad \underset{p = 1, 2, 3 \ldots}{. \; . \; . \; . \; . \; .} \; 19)$$

Die möglichen Eigenschwingungszahlen verhalten sich also wie die Reihe der ganzen Zahlen.

II. Elektrische Systeme.

Analog zu den mechanischen Systemen nennen wir eine stabile Anordnung von Elektronen ein elektrisches System. Die neue Physik neigt dazu, alle Atome als solche stabilen Systeme von Elektronen anzusehen; notwendig muß sie jedenfalls annehmen, daß in jedem Atom stabil angeordnete Elektronen enthalten sind; denn es gelingt durch allerlei Prozesse, dieselben von dem materiellen Rest zu trennen, der dann als positives Atomion mit der entsprechenden positiven Ladung übrigbleibt. Die Elektronen im Atom sind Beispiele elektrischer Systeme. Ebenso ist jeder abgegrenzte metallisch leitende Körper ein elektrisches System. Denn nach der Elektronentheorie der Metalle ist in ihm stets eine Anzahl von Atomen dissoziiert, d. h. ihre Elektronen haben den Atomverband verlassen und schweifen „frei" zwischen den materiellen Teilchen innerhalb des Metallvolumens hin und her. Elektrolytisch leitende Körper sind keine rein elektrischen, sondern gewissermaßen elektrisch-mechanische Systeme, weil bei ihnen die Moleküle in positive und negative Ionen dissoziiert sind, eine Bewegung von Elektrizität also nie ohne gleichzeitige Bewegung von Materie möglich ist. Solange aber nur die Bewegung der Elektrizität allein dabei ins Auge gefaßt wird, kann man sie gleichfalls als elektrische Systeme betrachten. Aehnlich ist es mit gasförmigen Leitern.

Es ist nun zu zeigen, daß solche elektrischen Systeme, analog den mechanischen, Anordnungs- und Geschwindigkeitsstabilität haben, daß darum alle dort gefundenen Beziehungen hier wiederkehren, und daß namentlich die elektrischen Systeme in ganz analoger Weise Schwingungen machen können, wie die mechanischen Systeme mechanische.

1. Anordnungsstabilität elektrischer Systeme. Sobald die normale Anordnung der Elektronen in einem elektrischen System gestört wird, treten elektrische Kräfte auf, welche die alte Anordnung wieder herzustellen suchen. In einem Atom werden so die Elektronen in der normalen Anordnung durch Anordnungskräfte festgehalten, über deren tieferes Wesen man allerdings noch wenig Zuverlässiges weiß. In einem Leitersystem andererseits ist die normale Anordnung die, welche innerhalb des ganzen Leitervolumens konstantes Potential sicherstellt. Das verlangt, daß die freien Elektronen in ganz bestimmter nach der Potentialtheorie zu berechnender Weise über das Leitervolumen verteilt sind. Man sieht, daß dabei eine fortdauernde Wanderung von freien Elektronen nicht ausgeschlossen ist, nur muß jedes von einer Stelle wegwandernde Elektron alsbald durch ein zuwanderndes ersetzt werden. Sobald diese Gleichgewichtsanordnung gestört wird, treten elektrische Spannungen auf, welche auf Wiederherstellung der Gleichgewichtsverteilung drängen; ihre Gesamtheit bildet den elektrischen Formänderungswiderstand $\mathfrak{W}_F$ des elektrischen Systems.

Die Ueberführung des Systems in eine neue Anordnung bedeutet demnach auch hier, daß äußere elektrische Kräfte mit dem elektrischen Formänderungswiderstand $\mathfrak{W}_F$ in Arbeitsbeziehung treten und entweder

elektrische Anordnungsenergie auf das System übertragen oder ihm solche entziehen.

Als Maß der elektrischen Formänderung wählt man die z. B. durch die Symmetrieebene des elektrischen Systems verschobene Elektrizitätsmenge q. Dann gilt stets

$$\mathfrak{W}_F = \frac{1}{\mathfrak{C}} q = e_{\mathfrak{C}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

eine Beziehung, die der in Gleichung (1) ausgedrückten bei mechanischen Systemen völlig analog ist. $e_{\mathfrak{C}}$ ist die elektrische Spannung, durch welche $\mathfrak{W}_F$ zum Ausdruck kommt, $\frac{1}{\mathfrak{C}}$ ist dann das „elektrische Direktionsmoment" und dient als Maß der elektrischen Anordnungsstabilität gegen die betrachtete elektrische Deformierung. $\mathfrak{C}$ ist das Maß der elektrischen Nachgiebigkeit und sei Kapazitätsmoment genannt.

Die in einem elektrischen System durch die elektrische Deformierung q aufgespeicherte Anordnungsenergie (elektrostatische Feldenergie) ist analog zu Gleichung (2)

$$W_e = \frac{1}{2} \frac{q^2}{\mathfrak{C}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 21)$$

2. Geschwindigkeitsstabilität elektrischer Systeme. Auch für die Elektrizität gilt das Gesetz der Trägheit: der Geschwindigkeitsänderung eines Elektrons widersetzt sich seine durch seine Aetherbeziehungen verursachte elektrische Trägheit, deren Wesen im Artikel „Elektromotorische Kräfte" 2bβ auseinandergesetzt ist. Daher widersetzt sich auch ein elektrisches System einer Geschwindigkeitsänderung seiner Elektronen durch Entwickelung eines elektrischen Trägheitswiderstandes $\mathfrak{W}_T$. Die Ueberführung des Systems in einen neuen Bewegungszustand seiner Elektronen bedeutet, daß äußere elektrische Kräfte mit dem elektrischen Trägheitswiderstand in Arbeitsbeziehung treten und dem System entweder elektrokinetische Energie übertragen oder sie ihm entziehen.

Handelt es sich um Bewegungen in dem System, die zu einer durch die verschobene Elektrizitätsmenge q meßbaren elektrischen Deformierung gehören, so gilt hier wieder analog wie Gleichung (3) bei den mechanischen Systemen

$$\mathfrak{W}_T = \mathfrak{L} \frac{d^2q}{dt^2} = \mathfrak{L} \frac{di}{dt} = e_{\mathfrak{L}} \quad . \quad . \quad . \quad 22)$$

wenn $i = \frac{dq}{dt}$ als Stromstärke der Elektrizitätsverschiebung durch die Symmetrieebene eingeführt wird. $e_{\mathfrak{L}}$ ist die elektrische Spannung, durch welche $\mathfrak{W}_T$ zum Ausdruck kommt, $\mathfrak{L}$ ist das Maß des elektrischen Trägheitswiderstandes des Systems für die betrachtete Elektronenverschiebung. Wir nennen diese Größe Selbstinduktivitätsmoment. Die in dem System bei der Stromstärke i aufgespeicherte elektrokinetische Energie (magnetische Feldenergie) ist analog zu Gleichung (4)

$$W_m = \frac{1}{2} \mathfrak{L} i^2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23)$$

3. Schwingungen elektrischer Systeme. Es ist jetzt in Analogie zu den mechanischen Systemen ohne weiteres klar, daß ein elektrisches System schwingungsfähig sein muß. Hat man durch eine äußere elektrische Kraft die normale Anordnung der Elektronen gestört, und läßt nun die äußere Kraft zu wirken aufhören, so beginnen die Elektronen in ihre normale Anordnung zurückzukehren, verlieren ihre elektrostatische Energie und verwandeln sie in elektrokinetische Energie. In der normalen Anordnung angelangt, haben sie lediglich elektrokinetische Energie, darum streben sie über die normale Anordnung hinaus, in eine neue Deformierung entgegengesetzten Vorzeichens. Die elektrokinetische Energie wird wieder zu elektrostatischer usf. in alle Ewigkeit, falls keine Verluste eintreten. Solche Energieverluste treten aber auch hier stets auf, z. B. immer dadurch, daß sich die Elektronen bei den Schwingungen auf dem Leiter verschieben. Dabei wird durch Zusammenstöße der Elektronen mit Molekülen kinetische Energie der Elektronen in solche der Moleküle, d. h. in Wärme verwandelt (Joulesche Wärme). Daher klingen auch bei elektrischen Systemen die Schwingungen allmählich ab, bis alle anfänglich aufgespeicherte Energie durch die Verluste verzehrt ist.

4. Charakteristische Eigenschaften der elektrischen Schwingungen. Alles ist hier genau wie bei den Schwingungen mechanischer Systeme. Auch die elektrischen Systeme haben meist eine ganze Anzahl von Eigenschwingungen verschiedener Schwingungszeit, deren jeweilige Kombination die Schwingungsform bestimmt. Die Schwingungszeit jeder solchen Eigenschwingung läßt sich aus der zu Gleichung (14) analogen Beziehung

$$(T_p)_0 = 2\pi \sqrt{\mathfrak{L}_p \mathfrak{C}_p} \quad \underset{p=1,2,3}{. \; . \; . \; .} \quad 24)$$

berechnen, wenn die Größen $\mathfrak{L}_p$ und $\mathfrak{C}_p$ für die betrachtete Schwingung bekannt sind. Die Ableitung dieser Beziehung ergibt sich in derselben Weise, wie bei den mechanischen Schwingungen gezeigt wurde. Durch geeignete Anregung läßt sich jede dieser Schwingungen für sich herstellen. Für jede derselben gilt, analog Gleichung (5)

$$q_p = Q_p \cos \omega_p t$$

oder nach Gleichung (20)

$$e_p = \frac{q_p}{\mathfrak{C}} = E_p \cos \omega_p t \quad \ldots\ldots \quad 25)$$

und daher

$$i_p = -\frac{dq_p}{dt} = Q_p \omega_p \sin \omega_p t$$

$$= I_p \sin \omega_p t = I_p \cos\left(\omega_p t - \frac{\pi}{2}\right) \quad . \quad 25a)$$

wobei

$$\omega_p = \frac{2\pi}{(T_p)_0} = \frac{1}{\sqrt{\mathfrak{L}_p \mathfrak{C}_p}} \quad \ldots \quad 24a)$$

die Kreisfrequenz ist, E_p und I_p die Schwingungsamplituden sind. Die Anzahl der Freiheitsgrade oder die Reihe der möglichen Eigenschwingungen ist auch hier von der besonderen Form und Anordnung des Systems bestimmt und für jedes System charakteristisch.

Die oben erwähnte Dämpfung durch Wärmeverlust bei der Leitung ist der durch Reibung bei den mechanischen Systemen ganz analog. Der auf den elektrischen Leitungsstrom wirkende elektrische Reibungswiderstand ist stets $i\mathfrak{R}$ ($\mathfrak{R}$ = Ohmsches Widerstandsmoment vgl. S. 1061). Also verläuft die elektrische Schwingung, analog Gleichung (9), nach dem Gesetz

$$e_p = E_p \, \varepsilon^{-\delta_p t} \cos \omega_p t$$

$$= E_p \, \varepsilon^{-\mathfrak{d}_p z} \cos \omega_p t \quad \ldots \quad 26)$$

so daß

$$\left.\begin{aligned} i_p &= Q_p \varepsilon^{-\delta_p t} \sqrt{\omega_p^2 + \delta_p^2} \sin(\omega_p t + \varphi) \\ &= I_p \varepsilon^{-\mathfrak{d}_p z} \cos\left(\omega_p t + \frac{\pi}{2} + \varphi\right) \end{aligned}\right\} \quad 26a)$$

wird, wo $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\delta_p}{\omega_p}$ und entsprechend Gleichung (12) und (13)

$$\delta_p = \frac{\mathfrak{R}_p}{2\mathfrak{L}_p} \text{ und } \mathfrak{d}_p = \frac{\mathfrak{R}_p}{2\mathfrak{L}_p} T_p \quad . \quad . \quad 27)$$

ist.

Figur 5 zeigt den Verlauf von $\mathfrak{e}_p$ und i an

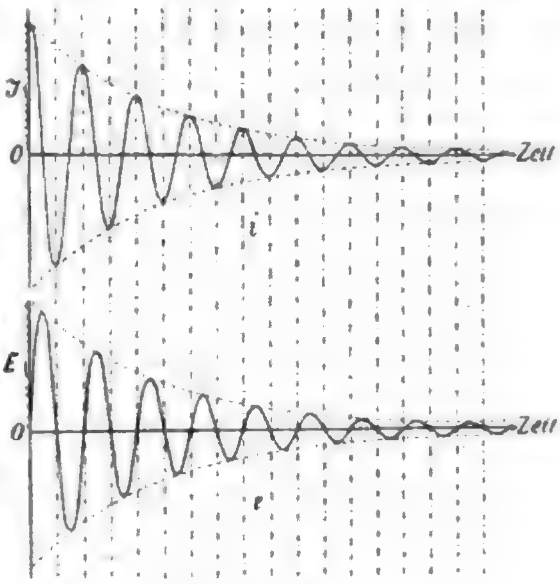


Fig. 5.

einem Beispiel. Die entsprechende Verteilung der Energien

$$W_m = \frac{1}{2} \mathfrak{L} i^2 \text{ und } W_e = \frac{1}{2} \frac{q^2}{\mathfrak{C}} = \frac{1}{2} \mathfrak{C} e^2$$

zeigt Figur 6. Man sieht, daß W_m stets ein Maximum hat, wenn $W_e = 0$ ist und umgekehrt, und daß die Summe der beiden Energien nach dem Exponentialgesetz $W\varepsilon^{-2\delta t}$ abnimmt.

Wie bei den mechanischen Schwingungen mit Gleichungen (10) bis (13) zeigt man leicht, daß $\mathfrak{d}$ hier den Bruchteil der in jeder Periode umgesetzten Energie bezeichnet, der in Leitungswärme verwandelt wird. Auf weitere Dämpfungsursachen einzugehen wird weiterhin Gelegenheit sein.

Die Dämpfung wirkt auch hier auf die Schwingungszeit modifizierend, so daß statt der Formel (24) die Beziehung

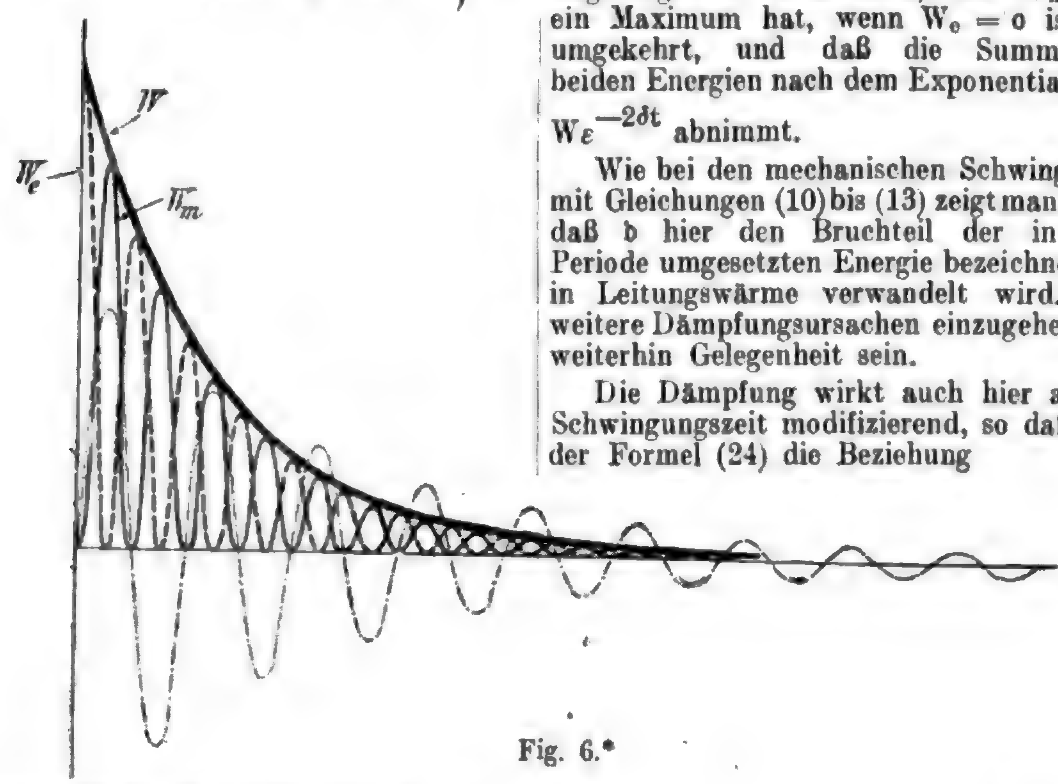


Fig. 6.*

$$T_p = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{\mathfrak{L}_p \mathfrak{C}_p} - \delta_p^2}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 24a)$$

gilt, oder in Annäherung

$$T_p = (T_p)_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\mathfrak{d}_p}{2\pi}\right)^2} \quad . \; . \; 24b)$$

Praktisch kann man fast immer $T_p = (T_p)_0$ setzen.

5. **Beispiele.** 5a) Kondensatorsysteme. Sie bestehen aus einem Kondensator C, dessen Belegungen durch eine Leitungsbahn L verbunden werden (Fig. 7).



Fig. 7.

Ladet man den Kondensator auf die Potentialdifferenz E Volt, indem man Q Coulomb Elektronen von der einen Belegung auf die andere verschiebt, so wird aus Gleichung (20)

$$Q = EC \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 28)$$

wo C die in Farad gemessene elektrostatische Kapazität des Kondensators ist. Hier wird also das Kapazitätsmoment $\mathfrak{C}$ identisch mit der elektrostatischen Kapazität C. Verbindet man jetzt die beiden Belegungen durch die Leitungsbahn, so erfolgt eine elektrische Schwingung, bei der längs der Leitungsbahn zu gleichen Zeiten überall dieselbe Stromstärke herrscht (quasistationäre Stromverteilung).

α) Schwingungszeit. Bei einer solchen „quasistationären Stromverteilung" widersetzt sich die Leitungsbahn einer Geschwindigkeitsänderung der Elektronen mit einer Gegen-EMK[1])

$$e_L = L \frac{di}{dt} \text{ Volt.} \quad . \; . \; . \; . \; 29)$$

wo L die in Henry gemessene Selbstinduktivität der Leitungsbahn bezeichnet. Hier ist also der elektrische Trägheitswiderstand durch e_L zu messen, und das Selbstinduktivitätsmoment $\mathfrak{L}$ der Gleichung (22) ist mit der Selbstinduktivität L (auch Selbstinduktion genannt) identisch. So wird hier

$$T_0 = 2\pi \sqrt{LC} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 30)$$

wenn wir die Dämpfung klein annehmen. Da hier die Elektronen in einer nur durch die Isolationsschicht des Kondensators getrennten, sonst aber geschlossenen Bahn schwingen, nennt man diese Systeme auch geschlossene Schwingungskreise. Die beschriebene Schwingung bildet die völlige Analogie zu der Schwingung des mathematischen Pendels. Die geschlossenen Systeme können auch Oberschwingungen ausführen, indem sich längs der Leitungsbahn Schwingungsknoten und Bäuche ausbilden. Diese Schwingungen interessieren uns hier aber nicht, sie fallen unter die in dem nächsten Absatz zu behandelnden Beispiele.

β) Dämpfung. Die Dämpfung der Kondensatorschwingungen geht auf folgende Energieverluste zurück: 1. Wärmeverluste in der Leitungsbahn (Joulesche Dämpfung), von der schon gesprochen wurde. 2. Verluste im Dielektrikum des Kondensators. 3. Verluste durch das sogenannte Sprühen der Kondensatoren. 4. Verluste durch Wirbelströme, die das magnetische Wechselfeld der Schwingung in den Leiterteilen des Systems oder auch in benachbarten Leitern erzeugt. 5. Falls die Leitungsbahn durch eine gasförmige Bahn (Funkenstrecke) unterbrochen ist, Verluste in dieser gasförmigen Leitungsbahn. Ueber sie wird in Abschnitt **B I 2** eingehend gesprochen.

Ueber das Wesen der unter 2 genannten dielektrischen Verluste ist im Artikel „Dielektrizität" nachzulesen. Hier genügt es zu bemerken, daß bei den meisten Materialien unabhängig von der Frequenz in jeder Periode immer der gleiche Bruchteil der im Kondensator enthaltenen Energie verloren wird; daher lassen sich diese Verluste durch ein dem Jouleschen Dekrement $\mathfrak{d}_J$ analoges dielektrisches Dekrement $\mathfrak{d}_D$ zum Ausdruck bringen. Sein Wert ist charakteristisch für jedes Material: er nimmt mit steigender Temperatur zu. Unmerklich klein ist er bei Luft, sehr klein bei trockenem Paraffin- und Transformatorenöl ($\mathfrak{d}_D = 0{,}001$ bis $0{,}002$), bei gutem Flintglas ($\mathfrak{d}_D = 0{,}006$ bis $0{,}01$), kann aber bei gewöhnlichem Glas, Hartgummi, Glimmer, Mikanit usw. recht groß werden. Bei manchen Materialien ist $\mathfrak{d}_D$ von der Energiebelastung W_e des Kondensators abhängig, z. B.

$$\mathfrak{d}_D = \alpha + \beta W_e \text{ oder } \mathfrak{d}_D = \alpha W_e^2 \quad . \; 30)$$

(α und β Konstanten des Materials).

Ueber die sehr zahlreichen Formen von Kondensatoren, die man ausführt, ist in dem Artikel „Kapazität" Ausführliches enthalten. Besonders kleine Verluste haben die Gaskondensatoren, die man, um sie auch für hohe Spannungen brauchbar zu machen, unter hohen Druck bringt (Preßgaskondensatoren).

Die Verluste durch Sprühen treten durch Büschel- und Glimmentladungen auf, die entweder durch die isolierende Luftumgebung erfolgen, oder in Gestalt von züngelnden

[1]) EMK = Elektromotorische Kraft.

Gleitbüscheln an der Oberfläche der Isolatoren vom Rande der Belegungen ausgehen (vgl. Fig. 8). Das Sprühen erfordert, wie auch die

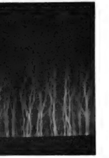


Fig. 8.*

Theorie der Gasentladungen lehrt, hohe Spannungen. Auch diesen Verlusten kann man durch ein Zusatzdekrement $\mathfrak{b}_{sp}$ Rechnung tragen, welches durch richtige Konstruktion bei einer Spannungsamplitude von 30000 Volt unter 0,002, von 40000 Volt unter 0,007 herabgedrückt werden kann.

Die Verluste durch Wirbelströme können ganz vermieden werden, wenn man alle Leiterteile so anordnet, daß sie nicht von den pulsierenden Magnetkraftlinien des schwingenden Stromes geschnitten werden können. Die von dem Magnetfelde in der Leitungsbahn selbst hervorgerufenen Wirbelströme bringen in der Leitungsbahn die Erscheinungen hervor, die man als Stromverdrängung oder Hauteffekt (auch Skineffekt) bezeichnet. Genaueres ist darüber in den Artikeln „Magnetfeldwirkungen" und „Wechselströme" angegeben. Sie bestehen darin, daß die gleichmäßige Verteilung der Strömung über den Querschnitt, wie sie bei Gleichstrom vorhanden ist, bei Wechselstrom um so weniger möglich wird, je höher die Frequenz des Wechselstromes ist. Dadurch erscheint, wie man leicht einsieht, der Widerstand der Leitungsbahn erhöht, so daß das Joulesche Dekrement mit der Frequenz stark wächst. Gleichzeitig erscheint die Selbstinduktivität verkleinert, da das Magnetfeld im Innern der Leitungsbahn verschwindet. Es gelingt diese Wirkungen zu vermeiden, indem man statt massiver Drähte Litzendrähte verwendet, die aus zahlreichen voneinander isolierten und verdrillten Einzeldrähten bestehen. Bei Spulen kann die Wirkung der Stromverdrängung besonders groß werden.

Unter peinlichster Anwendung aller Vorsichtsmaßregeln gegen die genannten Verluste gelingt es, Kondensatorkreise zu konstruieren, deren Gesamtdekrement kleiner als 0,01 ist. Dekremente unter 0,003 dürften aber überhaupt nicht zu erreichen sein.

γ) Variometer. Für viele Zwecke, namentlich der drahtlosen Telegraphie, ist es wünschenswert, Kondensatorkreise zu haben, deren nach der Formel $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ zu berechnende Schwingungszeit in weiten Grenzen variabel ist. Sprungweise Variation erreicht man leicht durch Parallelschaltung von mehr oder weniger einzelnen Kondensatoren oder durch Einschalten von mehr oder weniger Spulenwindungen in die Leitungsbahn. Zur stetigen Variation dienen die Drehkondensatoren und Induktivitätsvariometer. Bei den Drehkondensatoren bestehen die Belegungen aus Systemen parallelgeschalteter halbkreisförmiger Platten die durch Drehung des einen Systems mit einem mehr oder weniger großen Sektor zur Deckung gebracht werden. Figur 9 zeigt das

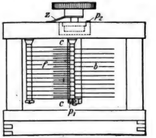


Fig. 9.*

schematisch, Figur 10 perspektivisch an einem Beispiel. Eine Anordnung, die den verfügbaren Kondensatorraum am besten ausnutzt, ist schematisch in Figur 11 abgebildet.

Die Selbstinduktionsvariometer sind Anordnungen von Spulen, die gegeneinander verdreht werden können, so daß sich ihre Magnetfelder entweder addieren oder subtrahieren. Figur 12 zeigt die perspektivische Ansicht einer für niedrige Spannungen geeigneten Anordnung, Figur 13 die Schaltung einer aus zwei Flachspulen bestehenden Anordnung. Die nebeneinander gezeichneten Flachspulen werden übereinander gelegt und um die zur Spulenfläche senkrechte Mittelachse gedreht.

Kombinationen aus solchen Kapazitäts- und Induktionsvariometern werden wir später als sogenannte Wellenmesser kennen lernen.

Sollen die Kondensatorkreise für hohe Spannungen benutzt werden, und stehen keine Kondensatoren zur Verfügung, deren

Dielektrikum diesen Spannungen gewachsen ist, so kann man sich durch Hintereinander-

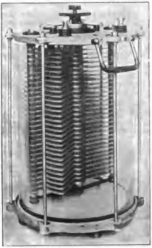


Fig. 10.*

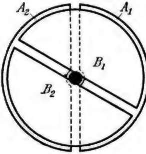


Fig. 11.*

schaltung helfen. Da die Kapazität C eines Systems hintereinander geschalteter Kondensatoren C_1, C_2, C_3 aus

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad . \; . \; . \quad 31)$$

gefunden wird, und parallelgeschaltete Kondensatoren ihre Kapazitäten einfach addieren, so sind die in Figur 14abc schematisch dargestellten Systeme in bezug auf die Schwingungszeit völlig gleichwertig. Es kann vorkommen, daß die mit geringer Be-



Fig. 12.*

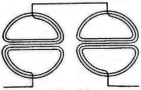


Fig. 13.*

anspruchung des einzelnen Kondensators arbeitenden Systeme nach Figur 14b und noch mehr nach Figur 14c kleinere Dekremente

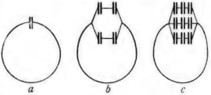


Fig. 14.*

haben als die nach Figur 14a, wenn nämlich Verlustquellen existieren, die mit höheren Potenzen der Spannungsdifferenz E als der zweiten wachsen. Im allgemeinen ist aber durch diesen Kunstgriff eine erhebliche Verkleinerung von $\mathfrak{d}$ nicht zu erreichen.

5b) Lineare Oszillatoren. Wie den Schwingungen des mathematischen Pendels

die elektrischen Schwingungen der Kondensatorkreise, so entsprechen den Luftsäulenschwingungen die elektrischen Schwingungen gerader Leiter oder Stäbe, der sogenannten linearen Oszillatoren. Konzentriert man mit Hilfe einer äußeren EMK Elektronen an dem einen Ende eines solchen Stabes und läßt die äußere EMK zu wirken aufhören, so vollziehen sich Schwingungen, die ganz den Luftsäulenschwingungen analog sind, wie sie in Figur 4 dargestellt wurden. Lassen wir durch die ausgezogenen Kurven dieser Figur die Amplitude der Stromverteilung, durch die gestrichelten die Amplitude der Spannnungsverteilung dargestellt sein, so stellen jene Figuren ohne weiteres auch die möglichen elektrischen Schwingungen, Grundschwingung und Oberschwingungen, eines linearen Oszillators dar. Strom und Spannung haben hier zwar noch an allen Stellen gleiche Phase, aber im Gegensatz zu den Kondensatorschwingungen nicht mehr an allen Stellen gleiche Amplitude. Diese ist vielmehr sinusförmig verteilt und bildet Knoten und Bäuche, wie es analog bei den Luftsäulen war. Wo die Stromknoten liegen, hat die Spannung Bäuche und umgekehrt. Als Maß der Formänderung wird die im Strombauche verschobene Elektrizitätsmenge q_b gewählt; die an anderen Stellen verschobenen Elektrizitätsmengen q_x stehen zu ihr in der Beziehung

$$q_x = q_b \cos \frac{2\pi}{\lambda_p} x \quad . \; . \; . \; . \; 32)$$

wo x der Abstand vom Ende des Oszillators λ_p der Abstand eines Knotens vom übernächsten (Wellenlänge) ist. Die Spannungen e_x sind überall q_x proportional, also ebenso verteilt, wie q_x selbst. Die Stromstärkeverteilung ist analog

$$i = -\frac{dq_x}{dt} = i_b \sin \frac{2\pi}{\lambda_p} x \quad . \; . \; 32a)$$

Die Schwingungszeiten der möglichen Eigenschwingungen verhalten sich, wie bei den Luftsäulen, wie die Reihe der ganzen Zahlen, und sie sind analog wie dort durch

$$T_p = \frac{2\pi}{p} \sqrt{\mathfrak{L}_1 \mathfrak{C}_1}, \quad . \; . \; . \; . \; . \; 33) \qquad p = 1, 2, 3$$

darzustellen, wenn $\mathfrak{L}_1$ und $\mathfrak{C}_1$ für die Grundschwingung gelten.

Induktivitätsmoment $\mathfrak{L}_1$ und Kapazitätsmoment $\mathfrak{C}_1$ der Grundschwingung ergeben sich aus der Induktivität $L^{(1)}$ und Kapazität $C^{(1)}$ der Längeneinheit des Drahtes in folgender Weise: Es sei allgemein bei einem Schwingungskreise die Stromstärkeverteilung $i = i_b f(x)$, die Spannungsverteilung $e = e_b \varphi(x)$. Die magnetische Feldenergie W_m der Schwingung setzt sich dann zusammen aus den Anteilen, die jedes Element dx der Schwingungsbahn beiträgt, so daß

$$W_m = \frac{1}{2}\int_0^l L^{(1)} i^2 dx = \frac{1}{2} i_b^2 L^{(1)} \int_0^l f(x)^2 dx = \frac{1}{2} i_b^2 \mathfrak{L} \quad [34a)$$

Ebenso findet man für die elektrische Feldenergie

$$W_e = \frac{1}{2}\int_0^l C^{(1)} e^2 dx = \frac{1}{2} e_b^2 C^{(1)} \int_0^l \varphi(x)^2 dx = \frac{1}{2} e_b^2 \mathfrak{C} \quad [34b)$$

Die pro Sekunde in Joulesche Wärme verwandelte Energie ist

$$L_J = \int_0^l R^{(1)} i^2 dx = i_b^2 R^{(1)} \int_0^l f(x)^2 dx = i_b^2 \mathfrak{R} \quad [34c)$$

$R^{(1)}$ ist der Ohmsche Widerstand der Längeneinheit, $\mathfrak{R}$ das Widerstandsmoment für die betrachtete Schwingung. Die Integrale sind stets über den ganzen Schwingungskreis zu erstrecken.

Da bei linearen Oszillatoren

$$f(x) = \sin \frac{2\pi}{\lambda} x; \; \varphi(x) = \cos \frac{2\pi}{\lambda} x$$

(e ist an jeder Stelle q proportional), so wird für die Grundschwingung

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{L}_1 &= L^{(1)} \int_0^l \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) dx = \frac{L^{(1)} l}{2} \\ \mathfrak{C}_1 &= C^{(1)} \int_0^l \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) dx = \frac{C^{(1)} l}{2} \\ \mathfrak{R}_1 &= R^{(1)} \int_0^l \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) dx = \frac{R^{(1)} l}{2} \end{aligned}\right\} \; . \; . \; 35)$$

Für die Oberschwingungen wird

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{L}_p &= \frac{1}{p} \mathfrak{L}_1 = \frac{L^{(1)} l}{2p} \\ \mathfrak{C}_p &= \frac{1}{p} \mathfrak{C}_1 = \frac{C^{(1)} l}{2p} \\ \mathfrak{R}_p &= \frac{1}{p} \mathfrak{R}_1 = \frac{R^{(1)} l}{2p} \end{aligned}\right\} \; . \; . \; . \; 35a)$$

Damit wird für den linearen Oszillator

$$T_p = 2\pi \sqrt{\mathfrak{L}_p \mathfrak{C}_p} = \frac{\pi l}{p} \sqrt{L^{(1)} C^{(1)}} = \pi \frac{\lambda}{2} \sqrt{L^{(1)} C^{(1)}} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 36)$$

Die Joulesche Dämpfung $(\delta_J)_p$ ergibt sich nach Gleichung (27) zu

$$(\delta_J)_p = \frac{\mathfrak{R}_p}{2\mathfrak{L}_p} = \frac{R^{(1)}}{2L^{(1)}} \quad . \; . \; . \; . \; 37)$$

d. h. sie ist für alle Eigenschwingungen dieselbe. Das Dekrement $(b_J)_p$ wird entsprechend

$$(b_J)_p = \delta_p T_p = \frac{\pi l}{2p} R^{(1)} \sqrt{\frac{C^{(1)}}{L^{(1)}}} = \frac{\pi \lambda}{4} R^{(1)} \sqrt{\frac{C^{(1)}}{L^{(1)}}} \quad 37a)$$

$\mathfrak{d}_J$ kann bei den linearen Oszillatoren sehr klein gemacht werden, dagegen besitzen sie eine sehr große Dämpfung durch Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen, von der im Kapitel D ausführlich gesprochen wird.

Für jeden Punkt x des linearen Oszillators gilt jetzt

$$\left.\begin{aligned}(i_x)_p &= (J_x)_p \sin \omega_p t \\ \text{und}\quad (e_x)_p &= (E_x)_p \cos \omega_p t\end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 38)$$

In den Bauchstellen also

$$\left.\begin{aligned}(i_b)_p &= (J_b)_p \sin \omega_p t \\ \text{und}\quad (e_b)_p &= (E_b)_p \cos \omega_p t\end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad 38a)$$

Das Energieprinzip liefert bei verschwindender Dämpfung nach Gleichungen (34) die allgemeine Beziehung

$$\frac{1}{2}(J_b)_p^2 \mathfrak{L}_p = \frac{1}{2}(E_b)_p^2 \mathfrak{C}_p \quad \ldots \quad 39)$$

woraus

$$(J_b)_p = (E_b)_p \sqrt{\frac{C^{(1)}}{L^{(1)}}} \quad \ldots \quad 39b)$$

d. h. das Verhältnis der Stromamplitude im Strombauch zur Spannungsamplitude im Spannungsbauch ist beim linearen Oszillator lediglich durch die geometrischen Verhältnisse des Oszillators bestimmt, da von diesen allein $C^{(1)}$ und $L^{(1)}$ abhängen. Natürlich solange wir ihn in Luft betrachten. Im Gegensatz zu den Kondensatorkreisen heißen die linearen Oszillatoren „offene“ Oszillatoren.

Zylindrische Drahtspulen sind auch offene Oszillatoren. Sie haben Eigenschwingungen ganz ähnlicher Art wie die gestreckten Drähte. Die Strom- und Spannungsverteilung ist für Grund- und Oberschwingungen qualitativ dieselbe, wie bei den gestreckten Oszillatoren. Die Frequenz der Grundschwingung kann bei langen dünnen Spulen bis $1\frac{1}{2}$ mal größer sein als die des gestreckten Oszillators derselben Drahtlänge. Bei einigermaßen breiten kurzen Spulen aber ist die Frequenz stets kleiner. Da bei Spulen das Kapazitätsmoment klein, das Selbst-

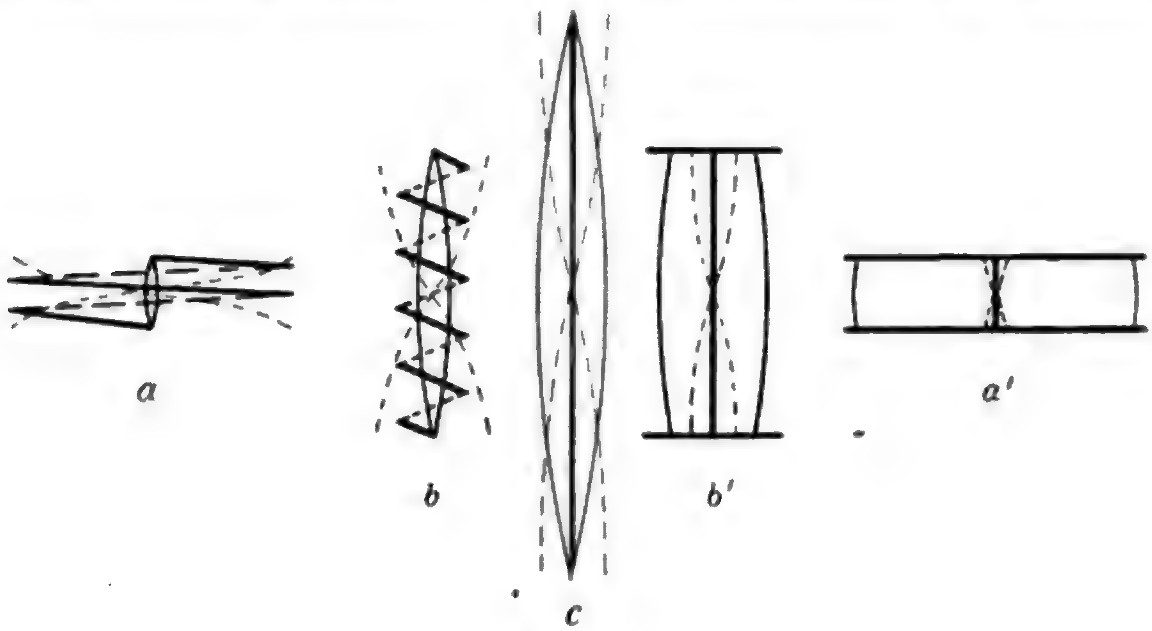


Fig. 15.

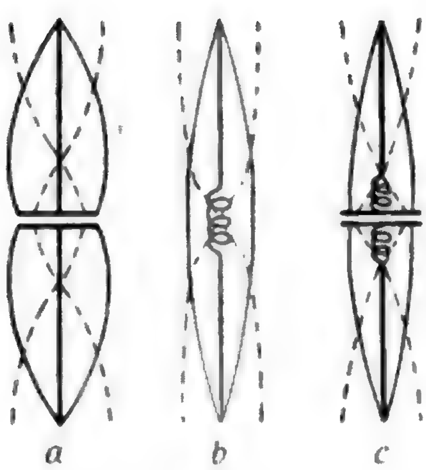


Fig. 16.

induktivitätsmoment groß ist, so folgt aus 39b), daß mit relativ kleinen Stromamplituden große Spannungsamplituden erreicht werden können. Auch sind solche Oszillatoren sehr „kapazitätsempfindlich“, d. h. benachbarte Leiter beeinflussen ihr Kapazitätsmoment und damit ihre Frequenz in empfindlicher Weise.

5c) Zusammengesetzte Oszillatoren. Eine ganz kurze weite Spule (Fig. 15a) und ein Kondensator mit ganz kurzer Leitungsbahn (Fig. 15a') stellen gewissermaßen Extreme von Oszillatorformen dar. Sie können so konstruiert werden, daß sie gleiche Frequenz haben. Bei 15a ist $\mathfrak{L}$ groß, $\mathfrak{C}$ klein, bei 15a' $\mathfrak{C}$ groß und $\mathfrak{L}$ klein. Infolgedessen

tritt, wenn dieselbe Energie zum Schwingen gebracht wird, bei 15a′ eine große Stromamplitude neben kleiner Spannungsamplitude auf, bei 15a das Umgekehrte (vgl. die schematische Andeutung in den Fig. 15). Streckt man die Spule mehr und mehr (Fig. 15b), so gelangt man unter Vergrößerung von $\mathfrak{C}$ mehr und mehr zu dem linearen Oszillator (Fig. 15c); ebenso unter Verkleinerung von $\mathfrak{C}$ und Vergrößerung von $\mathfrak{L}$, wenn man die Leitungsbahn der Form a′ mehr und mehr verlängert und schließlich die Belegungen verschwinden läßt (Fig. 15b′). Zwischenformen ergeben sich, wenn man entweder bei Form b Leitermassen, wie Kugeln, Platten usw. ansetzt, wodurch stets das Kapazitätsmoment und damit die Schwingungszeit vergrößert wird. Auf dieselbe Form kommt man bei b′, wenn man die Leitungsbahn zur Spule windet. Ferner lassen sich in die Leitungsbahn des gestreckten linearen Oszillators Spulen oder Kondensatoren oder beides einschalten (Fig. 16a, b, c). Mit Rücksicht auf die in Gleichung (39b) abgeleitete allgemeine Beziehung ergeben sich die schematisch in die Figuren eingezeichneten Amplitudenverhältnisse der Strom- und Spannungsverteilungen.

Die Oszillatoren der Form Figur 15 b′ lassen sich auch als verkürzte lineare Oszillatoren auffassen. Man kann nämlich jedes Endstück eines linearen Oszillators, das kleiner als die Hälfte ist, durch eine solche Leitermasse ersetzen, daß an der Strom- und Spannungsverteilung des übrigen Teiles nichts verändert wird (Fig. 17). Macht man schließlich die an-



Fig. 17.



Fig. 18.

gehängte Leitermasse groß genug, so bleibt nur die Hälfte des linearen Oszillators übrig, die aber genau so schwingt, als schwinge in der angehängten Leitermasse ihr Spiegelbild mit (Fig. 18). Die Spannungsamplitude E_0 an der Eintrittsstelle C des Stromes in die Leitermasse ergibt sich in diesen Fällen aus der dort herrschenden Stromamplitude J_0, aus

$$E_0 = \frac{J_0}{\omega C}, \quad \ldots \ldots \quad 40)$$

wenn C die Kapazität der angehängten Leitermasse ist. Denn es gilt für eine solche Kapazität stets

$$e = \frac{\int i\,dt}{C} \text{ und } e_0 \text{ ist nach (38)} = E_0 \cos \omega t$$

Aus diesem Grunde kann man einen linearen Oszillator in seiner Mitte mit der Erde verbinden und nun die Hälfte weglassen; dann bleiben alle seine Schwingungen möglich, die in der Mitte einen Spannungsknoten haben, also nach Figur 4 die Grundschwingung nebst den ungeradzahligen Oberschwingungen.

Bei der Form Figur 15a′ besteht die Grundschwingung in einem sinusförmigen Hin- und Herpendeln einer gewissen Elektrizitätsmenge Q = CV. Ein solches System nennt man auch wohl einen schwingenden Dipol.

Das Einschalten eines Kondensators in die Mitte eines linearen Oszillators (Fig. 17a) bedeutet, daß man die Kapazität dieses Kondensators mit dem Kapazitätsmoment des Oszillators hintereinander schaltet; daher wird das Gesamtkapazitätsmoment verkleinert, die Schwingungszeit wird kleiner; der Kondensator wirkt, als habe man den Oszillator „verkürzt". Umgekehrt wirkt eine eingeschaltete Spule Figur 17b durch Vergrößerung des Selbstinduktivitätsmomentes, als habe man den Oszillator „verlängert". Kombination beider (Fig. 17c) kann sich in bezug auf die Schwingungszeit aufheben. Alle diese Schaltungen haben aber auch bestimmte Folgen für die Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen, wovon in Kapitel D zu sprechen sein wird.

5d) Gekoppelte Systeme. α) Allgemeines. Jedes System, welches auch Oberschwingungen machen kann, kann als Koppelung von mehreren Systemen verschiedener Schwingungszeit aufgefaßt werden. Hier sollen unter gekoppelten Systemen indessen speziell Kombinationen von zwei Oszillatoren der unter 5a bis c behandelten Art verstanden sein, die in Energieaustausch miteinander stehen. Alsdann kann in keinem der gekoppelten Oszillatoren eine Schwingung erregt werden, ohne daß auch in dem anderen Schwingungen entstehen. Um ein mechanisches Beispiel anzuführen, so ist eine Stimmgabel, die mit einem Resonanzkasten versehen ist, ein gekoppeltes System dieser Art.

Die Koppelung zweier elektrischer Systeme 1 und 2 kann in dreierlei Weise erfolgen:

1. Magnetisch, wie in Figur 19. In diesem Falle findet der Energieaustausch zwischen

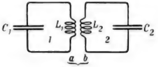


Fig. 19.

den beiden Systemen 1 und 2 durch Vermittelung von magnetischer Feldenergie statt, indem der magnetische Induktionsfluß des einen Systems ganz oder zum Teil auch mit der Leitungsbahn des anderen Systems verkettet ist. Dann wird nach dem Induktionsgesetz durch eine Schwingung des einen Systems eine Wechsel-EMK im anderen erregt (vgl. den Artikel „Transformator").

2. Galvanisch, wie in Figur 20. Hier ist beiden Systemen ein mehr oder weniger

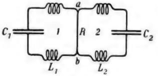


Fig. 20.

großes Stück a b der Leitungsbahn, vom Widerstande R gemeinsam, so daß jede Schwingung i des einen Systems in dem anderen eine Wechsel-EMK iR hervorruft.

Eine Kombination der magnetischen und galvanischen Koppelung stellt Figur 21 dar.

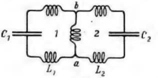


Fig. 21.

Hier ist sowohl ein Stück der Leitungsbahn, als auch ein Teil des Magnetfeldes beiden Systemen gemeinsam.

3. Elektrisch, wie in Figur 22. Hier findet der Energieaustausch zwischen den beiden Systemen durch Vermittelung elektrischer Feldenergie statt, indem ein gewisses elektrisches Feld beiden Kreisen gemeinsam ist. Dadurch erregt wieder jede Schwingung des einen Systems eine Wechsel-EMK der betreffenden Frequenz im anderen.

Die Amplitude dieser EMK ist unter sonst gleichen Umständen durch die Koppelungsstärke bestimmt. Sie läßt sich

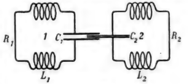


Fig. 22.

in allen Fällen in leicht ersichtlicher Weise variieren, indem man den gemeinsamen Teil an Magnetfeld, Widerstand oder elektrischem Feld kleiner oder größer macht. Praktisch am wichtigsten ist der Fall der magnetischen Koppelung. Man hat hierfür zweckmäßige Transformatoren konstruiert, welche die Koppelung bequem in weiten Grenzen variieren lassen. Figur 23

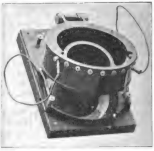


Fig. 23.*

zeigt einen solchen, bei dem man sowohl die gegenseitige Entfernung der beiden Koppelungsspulen als auch den Winkel ändern kann, den ihre Ebenen miteinander bilden. Auch die Figur 13 skizzierten Flachspulanordnungen lassen sich bequem als Koppelungsvariometer benutzen.

Wenn die Koppelung durch einen solchen Transformator vollzogen wird und Systeme mit quasistationären Schwingungen durch ihn gekoppelt sind, so ist vor allen Dingen die gegenseitige Induktivität L_{12} bestimmend für die Koppelungsstärke. L_{12} ist der Faktor mit dem $\frac{di_1}{dt}$ multipliziert werden muß, um die durch die Schwingung 1 in 2 erregte EMK zu erhalten. Entsprechend L_{21} für die Wirkung einer Schwingung 2 in 1. Bei nichtstationären Schwingungen tritt an Stelle von L_{12} ein Moment der gegenseitigen Induktivität

$\mathfrak{L}_{12}$, welches von der Stromverteilung in der Koppelungsbahn usw. abhängt. Es wird aus dem Energieansatz des gemeinsamen Magnetfeldes ebenso berechnet, wie $\mathfrak{L}_1$ und $\mathfrak{L}_2$ nach Gleichung 35 aus der magnetischen Energie jedes einzelnen Systems.

Neben $\mathfrak{L}_{12}$ und $\mathfrak{L}_{21}$ sind für die Stärke der Koppelung auch noch $\mathfrak{L}_1$ und $\mathfrak{L}_2$ bestimmend. Aus all diesen Größen bildet sich der Koppelungsfaktor

$$K = \sqrt{\frac{\mathfrak{L}_{21}\mathfrak{L}_{12}}{\mathfrak{L}_1\mathfrak{L}_2}} = \frac{\mathfrak{L}_{12}}{\sqrt{\mathfrak{L}_1\mathfrak{L}_2}} \quad \ldots \quad 41)$$

da $\mathfrak{L}_{21} = \mathfrak{L}_{12}$ ist. Koppelungskoeffizient heißt die Größe K', die definiert ist aus

$$K'^2 = K^2 - \left(\frac{\mathfrak{d}_1 - \mathfrak{d}_2}{2\pi}\right)^2 \quad \ldots \quad 41a)$$

Aehnliche Koppelungsgrößen bestimmen die Koppelung in den beiden anderen Fällen, der galvanischen und elektrischen Koppelung.

Durch die Wechsel-EMK, welche eine Schwingung des einen Systems von der Frequenz ω_1 auf das gekoppelte ausübt, wird in diesem eine Schwingung derselben Frequenz ω_1 „erzwungen". Beim Einschalten dieser EMK, das im allgemeinen plötzlich erfolgt, wird in mehr oder weniger heftiger Weise auch die Eigenschwingung des Systems 2 von der Frequenz ω_2 „angestoßen", die sich dann über die erzwungene Schwingung überlagert.

Je nach der Stärke der Koppelung und je nach der speziellen Beschaffenheit (Schwingungszahl, Dämpfung, Kapazitätsmoment, Selbstinduktivitätsmoment) der gekoppelten Kreise wirkt nun der Schwingungszustand in System 2 auf System 1 zurück. Man sieht ein, daß im allgemeinen ein recht verwickelter Verlauf des Energieaustausches zwischen 1 und 2 und damit recht verwickelte Schwingungsvorgänge auftreten müssen. Das ist ausführlich in den Artikeln „Schwingende Systeme" und „Schwingungen (Erzwungene Schwingungen)" auseinandergesetzt. Folgende speziellen Ergebnisse jener allgemeinen Betrachtungen seien hier hervorgehoben:

$\alpha\alpha$) Sehr lose Koppelung (K'^2 nahe 0), so daß die Rückwirkung von 2 auf 1 vernachlässigt werden kann. Wir nehmen vorerst an, daß in dem System 1 ungedämpfte Schwingungen von der Frequenz ω_1 fließen. Daß und wie man solche ungedämpften Schwingungen wirklich herstellen kann, wird im Abschnitt **B II** besprochen. Zu einer bestimmten Zeit werde der mit 1 sehr lose gekoppelte Kreis 2 geschlossen. Dann entwickelt der Strom $i_1 = I_1 \sin \omega_1 t$ in 2 eine EMK

$$e_{12} = \mathfrak{L}_{12}\frac{di_1}{dt} = \omega_1 \mathfrak{L}_{12} I_1 \cos \omega_1 t = E_{12} \cos \omega_1 t.$$

Die beim Einschalten erregte Eigenschwingung bestimmt hier den „Einschwingungsvorgang", der mit ihrem Abklingen sein Ende findet. Alsdann bleibt allein die erzwungene Schwingung ω_1 mit der Amplitude

$$I_2 = \frac{E_{12}}{\sqrt{\mathfrak{R}_2^2 + \left(\omega_1\mathfrak{L}_2 - \frac{1}{\omega_1\mathfrak{C}_2}\right)^2}} = \frac{E_{12}\omega_1}{\sqrt{[\mathfrak{L}_2(\omega_1^2 - \omega_2^2)]^2 + [\omega_1\mathfrak{R}]^2}} = \frac{E_{12}}{\omega_1\mathfrak{L}_2\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2\right\}^2 + \frac{4\delta_2^2}{\omega_1^2}}} \quad 42)$$

als Endzustand bestehen.

Die Anfangsamplitude I_2' der abklingenden Eigenschwingung ω_2 ist von der Phase abhängig, in der der Kreis 2 geschlossen wird. Und zwar so, daß I_2' stets gleich und entgegengesetzt dem Betrage i_2 ist, der der erzwungenen Schwingung im Momente des Einschaltens zukommt. Das ist in Figur 24

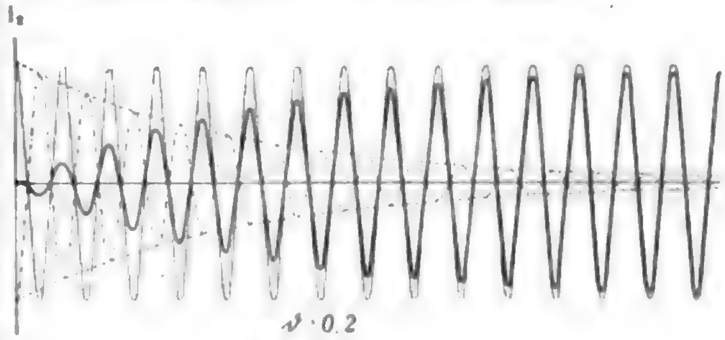


Fig. 24.*

an dem besonders einfachen und wichtigen Falle dargestellt, daß $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ wird (Resonanz). In diesem Falle wird

$$\omega_1\mathfrak{L}_2 = \frac{1}{\omega_1\mathfrak{C}_2} \quad \text{und} \quad I_2 = \frac{E_{12}}{\mathfrak{R}_2} \quad . \ . \ 42a)$$

Enthält Kreis 2 keinen Kondensator ($\mathfrak{C}_2 = \infty$), so lagert sich im Einschwingungszustand ein einmaliger exponentiell abklingender Stromstoß

$$i_2' = I_2' \varepsilon^{-\frac{\mathfrak{R}_2}{\mathfrak{L}_2}t} \quad \ldots \quad 43)$$

über die erzwungene Schwingung, für dessen Anfangswert I_2' wieder das oben Gesagte gilt (vgl. Fig. 25). Die Amplitude der endgültigen Schwingung wird dann

$$I_2 = \frac{E_{12}}{\sqrt{\mathfrak{R}_2^2 + \omega_1^2\mathfrak{L}_2^2}} = \frac{E_{12}}{\mathfrak{L}_2\sqrt{\omega_1^2 + 4\delta_2^2}} \quad 43a)$$

Macht man $\mathfrak{R}_2^2$ gegen $\omega_1^2\mathfrak{L}_2^2$ vernachlässigbar (δ_2 sehr klein), so wird I_2 von der Frequenz ω_1 unabhängig. Dieses Problem liegt vor, wenn man Kreis 2 mit einem eingeschalteten Strommesser als Meßkreis benutzt, um I_1 durch I_2 zu messen. Die Kombination läßt sich dann als ein einziger Schwin-

gungskreis betrachten, dessen Konstanten entsprechend andere sind.

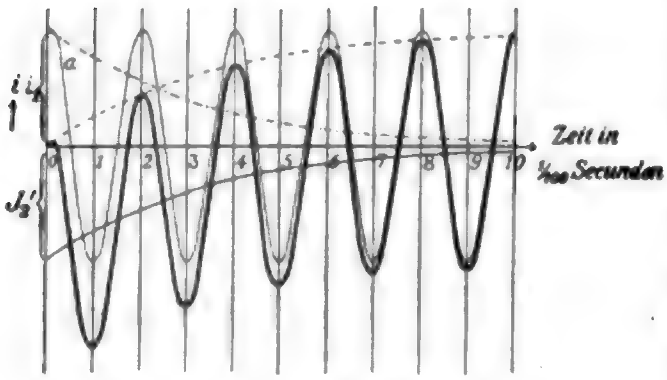


Fig. 25.*

Statt ungedämpfter Schwingungen sollen jetzt in 1 gedämpfte Schwingungen mit der Dämpfung δ_1 fließen. Dann ändert sich an dem Gesagten wenig, nur daß auch die erzwungene Schwingung abklingt, so daß schließlich von den beiden erregten Schwingungen nur diejenige übrig bleibt, welche die kleinere Dämpfung hat. Ist also δ_2 sehr groß, δ_1 klein, so erhält man im System 2 Schwingungen der Frequenz ω_1 und der Dämpfung δ_1; ist δ_2 klein, δ_1 groß, so verlaufen im Kreise 2 die Schwingungen mit der Frequenz ω_2 und der Dämpfung δ_2; sie werden im Einschwingungszustande gewissermaßen vom Kreise 1 „angestoßen".

Die effektive Stromstärke im Strombauche von System 2 ergibt sich, wenn beide Schwingungen nicht extrem stark gedämpft sind (δ_1 klein gegen ω_1, δ_2 klein gegen ω_2) und solange ω_2 und ω_1 nicht sehr viel verschieden voneinander sind ($\omega_1 - \omega_2$ sehr klein gegen ω_1 und ω_2) aus

$$(J_2)_{eff}^2 = \zeta \frac{E_{12}^2}{16\omega_1 \mathfrak{L}_2^2} \frac{\bar{\delta}_1 + \bar{\delta}_2}{\bar{\delta}_1 \bar{\delta}_2} \times \frac{1}{\left(1-\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\delta}_1+\bar{\delta}_2}{\omega_1}\right)^2}$$

$$= \zeta \frac{E_{12}^2 \pi}{8\omega_1^3 \mathfrak{L}_2^2} \frac{\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2}{\bar{\mathfrak{d}}_1 \bar{\mathfrak{d}}_2} \times \frac{1}{\left(1-\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\mathfrak{d}}_1+\bar{\mathfrak{d}}_2}{2\pi}\right)^2} \quad . . . . 44)$$

wo $\bar{\delta}$ und $\bar{\mathfrak{d}}$ die entsprechenden Größen der Schwingungskreise bei Resonanz ($\omega_2 = \omega_1$) bedeuten. ζ ist die Zahl der Entladungen, die pro Sekunde im Primärkreis erregt werden. Die effektive Spannung im Bauche der Spannung ergibt sich entsprechend aus

$$(E_2)_{eff}^2 = \zeta \frac{E_{12}^2}{16\,\omega_1} \frac{\bar{\delta}_1 + \bar{\delta}_2}{\bar{\delta}_2 \bar{\delta}_2} \times \frac{\omega_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}{\left(1-\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\delta}_1+\bar{\delta}_2}{\omega_1}\right)^2}$$

$$= \zeta \frac{E_{12}^2 \pi \omega_2}{8\omega_1} \frac{\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2}{\bar{\mathfrak{d}}_1 \bar{\mathfrak{d}}_2} \times \frac{\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2}{\left(1-\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\mathfrak{d}}_1+\bar{\mathfrak{d}}_2}{2\pi}\right)^2} \quad . . . 45)$$

Figur 26 erläutert das Gesagte an einem Beispiel für den Fall, daß $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ wird (Resonanz). Dann kann die Ueberеinanderlagerung der erzwungenen Schwingung und der Eigenschwingung als eine einzige Schwingung aufgefaßt werden; ihre Amplitudenkurve bestimmt sich als Differenz der beiden für 1 und 2 geltenden Exponentialkurven.

$\beta\beta$) Feste Koppelung ($K'^2 >> 0$). Alsdann kann die Rückwirkung der erzwungenen Schwingung auf die erzwingende nicht mehr vernachlässigt werden. Nur der Fall interessiert hier, daß die beiden gekoppelten Einzelsysteme gleiche Frequenzen haben, $\omega_1 = \omega_2 = \omega$. Die Verhältnisse sind völlig dem im Artikel „Schwingende Systeme" behandelten mechanischen Falle zweier ge-

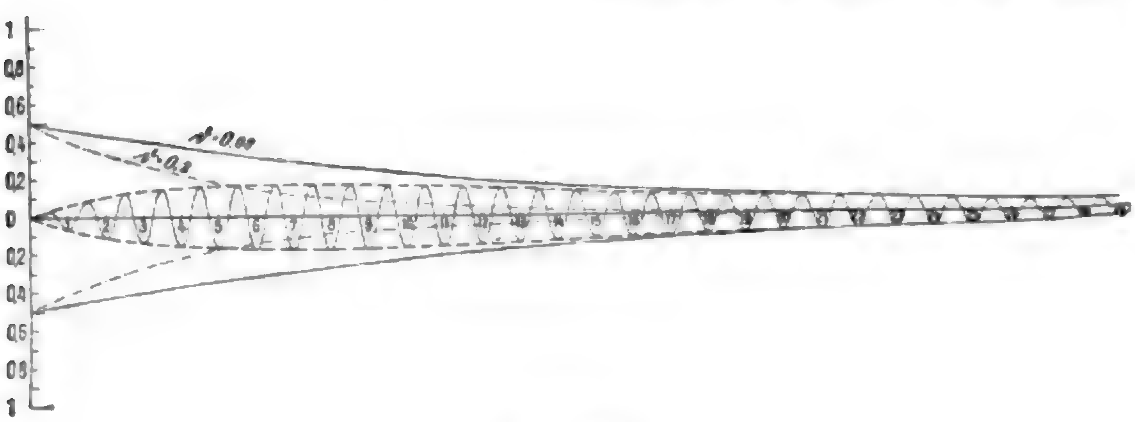


Fig. 26.*

koppelten Pendel analog. Man beobachtet folgendes:

Wird dem System 1 Energie mitgeteilt, die dasselbe in Schwingung versetzt, so wandert sie allmählich über die Koppelungsstelle in das System 2, welches schließlich die ganze Energie allein besitzt. Danach vollzieht sich der umgekehrte Vorgang von 2 auf 1 usf., bis die ganze Energie durch die Verluste verbraucht ist. Figur 27 zeigt den

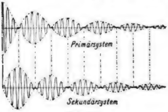


Fig. 27.*

entsprechenden Stromverlauf in 1 und 2. Figur 28 dasselbe, photographisch registriert mittels einer Glimmlichtoszillographenröhre (vgl. Kap. C II 3).

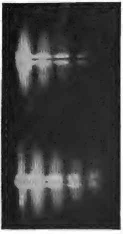


Fig. 28.*

Das Wesen dieser Energiewanderung zwischen 1 und 2 hin und her liegt in der Tatsache, daß das gekoppelte System bei dem beschriebenen Versuch, wie jene gekoppelten Pendel, zwei Hauptschwingungen a und b macht, die ungleiche Schwingungsfrequenz haben und durch Interferenz miteinander Schwebungen bilden. Das System kann nämlich so schwingen, wie in Figur 29 angedeutet; oder wie in Figur 30.

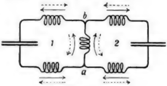


Fig. 29.

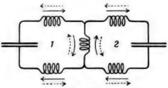


Fig. 30.

Die rechnerische Diskussion zeigt, daß für die Schwingungen a und b gilt

$$\omega_a = \frac{\omega}{\sqrt{1-K'}}\,; \quad \omega_b = \frac{\omega}{\sqrt{1+K'}} \quad . \quad 46)$$

$$\mathfrak{d}_a = \frac{\mathfrak{d}_1+\mathfrak{d}_2}{2}\,\frac{1}{\sqrt{1-K'}}\,; \quad \mathfrak{d}_b = \frac{\mathfrak{d}_1+\mathfrak{d}_2}{2}\,\frac{1}{\sqrt{1+K'}}. \quad 47)$$

Je fester also die Koppelung ist, desto mehr unterscheidet sich ω_b von ω_a, desto größer ist also auch die Frequenz, mit der die Energie zwischen 1 und 2 hin- und herpendelt. Die Dekremente $\mathfrak{d}_a$ und $\mathfrak{d}_b$ sind bei schwacher Koppelung nicht viel von dem Mittelwerte $\frac{\mathfrak{d}_1+\mathfrak{d}_2}{2}$ der beiden Systeme verschieden. Mit zunehmender Koppelungsstärke wird das Dekrement der Schwingung kleinerer Schwingungszahl ω_b kleiner, das andere größer als dieser Mittelwert.

Die Stromamplituden der beiden Schwingungen verhalten sich annähernd wie die Frequenzen

$$\left(\frac{J_a}{J_b}\right)_1 = \left(\frac{J_a}{J_b}\right)_2 = \frac{\omega_a}{\omega_b} \quad . \; . \; . \; . \quad 48)$$

Die Schwingung mit der größeren Frequenz hat also größere Amplitude wie die andere. Figur 31 zeigt diese Abhängigkeiten graphisch.

Durch geeignete Anregung kann man jede einzelne der Schwingungen a und b allein erzeugen. Dann verteilt sich die betreffende Schwingung je nach den speziellen Verhältnissen auf die Systeme 1 und 2, wie in Figur 29 und 30 angedeutet. Im allgemeinen aber entstehen bei einer Anregung beide

Schwingungen gleichzeitig und die Schwebungen, die sie miteinander bilden, veranlassen das Hin- und Herfluten der Energie zwischen 1 und 2, wie es beobachtet wird. Je fester die Koppelung, desto mehr solcher Schwebungen treten pro Sekunde auf.

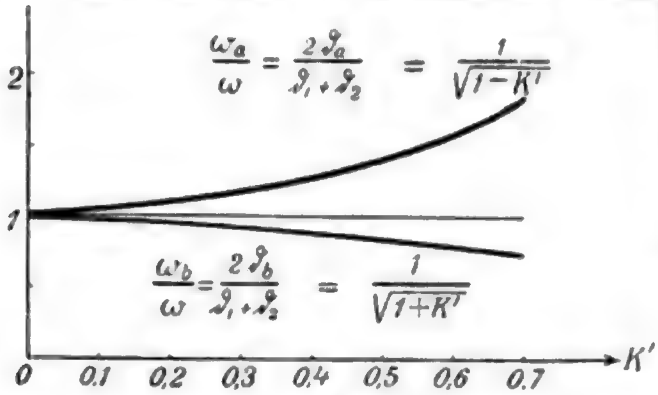


Fig. 31.

β) Spezielle Formen gekoppelter Systeme: Braunscher Oszillator; Lechersches Drahtsystem.

Besondere Bedeutung für die drahtlose Telegraphie haben die von F. Braun eingeführten gekoppelten Systeme, bestehend aus einem funkenerregten Kondensatorkreis und einem linearen Oszillator gleicher Eigenfrequenz (Fig. 32. Braunscher Oszillator). Sie bilden die elektrische Analogie zu den Stimmgabeln, die mit einer Luftsäule gleicher Eigenfrequenz gekoppelt sind. Auf die Eigenschaften, die den Braunschen Oszillator für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie so wertvoll machen, wird in Abschnitt **F** zurückgekommen.

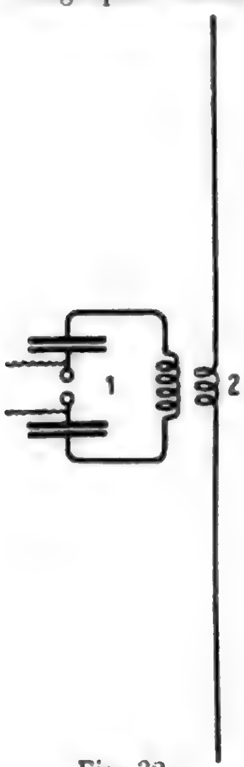


Fig. 32.

Bei sehr loser Koppelung wird der offene Teil des Braunschen Oszillators zu seiner Grundschwingung (vgl. Fig. 16b) angeregt, falls im geschlossenen Teile Funken spielen. Stimmt man den geschlossenen Teil so ab, daß er mit der 3-, 5-, 7-...fachen Frequenz schwingt wie der offene, so wird der letztere zu seiner 3., 5., 7. Oberschwingung angeregt und es entstehen auf dem Oszillatordraht Knoten und Bäuche, entsprechend der Figur 4 (vgl. auch **C II 4** Fig. 74). Der Abstand zweier Knoten auf dem freien Drahte mißt dabei, wie wir sahen, die halbe Wellenlänge $\frac{\lambda}{2}$, mit der sich die betreffende Schwingung längs des Drahtes fortpflanzt. Dabei gilt

$$\frac{\lambda}{T} = c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 49)$$

wo T die Schwingungszeit der Schwingung ist. c ist ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit längs des Drahtes, falls er in ein Medium von der Dielektrizitätskonstanten ε und der magnetischen Permeabilität μ eingebettet wird; c_0 dieselbe, wenn er im freien Aether verläuft (Lichtgeschwindigkeit). μ ist in den meisten dielektrischen Medien praktisch nicht von 1 verschieden.

Biegt man die Enden des linearen Oszillators zusammen, bis sie parallel nebeneinander herlaufen (Fig. 33), so erhält man eine

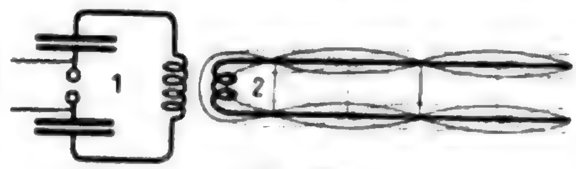


Fig. 33.

Anordnung, die zuerst von E. Lecher zum Studium von elektrischen Drahtwellen benutzt worden ist (Lechersches Drahtsystem). Bei dieser Anordnung kommen die gleichartigen Knotenstellen und Bauchstellen beider Oszillatorhälften symmetrisch eineinander gegenüber zu liegen, also so, daß zwei gegenüberliegende Drahtstellen in jedem Moment einen elektrischen Zustand gleicher Intensität, aber entgegengesetzten Vorzeichens haben. Daher teilt sich auch das zwischen den beiden Drähten gespannte dielektrische Feld längs der Drähte nach Knoten und Bäuchen der elektrischen und magnetischen Feldstärke ab. Die durch die Strom- und Spannungsknoten senkrecht zu dem Drahtsystem gelegten Ebenen bilden Knotenflächen für die magnetische und elektrische Kraft. Jn den ersteren bleibt das Dielektrikum dauernd frei von magnetischem Zwang, in den zweiten frei von elektrischem Zwang. In den Bauchflächen der elektrischen Kraft schwingt der elektrische Zwang mit der Maximalamplitude zwischen der positiven und negativen Richtung hin und her. Analog in den Bauchflächen der magnetischen Kraft der magnetische Zwang. Die ersteren haben von den letzteren einen Abstand $\frac{\lambda}{4}$. Kurz wir haben, von den beiden Drähten gewissermaßen zusammengehalten, in dem Dielektrikum ein Feld stehender elektromagnetischer Wellen.

B. Die Anregung elektrischer Schwingungen.

I. Gedämpfte Schwingungen.

1. Allgemeine Prinzipien. Nach den Erörterungen des Abschnittes A über mechanische Systeme lassen sich die Schwingungen z. B. eines Pendels um die Gleichgewichtslage auf folgende Arten erregen: a) Man führt dem Pendel Anordnungsenergie zu, indem man es aus der Gleichgewichtslage durch eine äußere Kraft herausführt. Sobald die äußere Kraft zu wirken aufhört, beginnen die Schwingungen. b) Man führt dem Pendel Bewegungsenergie zu, indem man ihm in der Ruhelage durch einen Stoß Geschwindigkeitsenergie erteilt.

In beiden Fällen geht der Schwingung ein Beladen des Systems mit Energie voraus, und die Schwingung selbst stellt gewissermaßen die Entladung des Systems dar; man nennt diese Schwingungen um die normale Gleichgewichtsanordnung daher „Entladeschwingungen". Das Pendel, wie jedes System, läßt sich aber auch c) in Ladeschwingungen versetzen: Man denke sich, daß an dem Pendel plötzlich eine gespannte Spiralfeder F mit einer bestimmten Kraft in der Richtung des Pfeiles zieht (Fig. 34). Dann ist die ursprüngliche vertikale Lage nicht mehr die Gleichgewichtsanordnung, sondern das System hat eine neue Gleichgewichtsanordnung in der gestrichelten Stellung erhalten, bei der die Federspannung dem Deformationswiderstand gerade das Gleichgewicht hält. In der alten Lage hat nunmehr das Pendel Anordnungsenergie in bezug auf die neue Lage; und wenn es sich aufmacht, um sich in die neue Gleichgewichtslage zu begeben, muß es jetzt um diese ebenso Pendelungen vollführen, wie in dem Falle a um die normale Ruhelage. Kurz es macht „Ladeschwingungen". Im allgemeinen ist das Direktionsmoment der neuen Ruhelage nicht dasselbe wie das in der alten, so daß die Schwingungszeit der Ladeschwingung von derjenigen der Entladeschwingung abweicht. Diese Abweichung ist indessen verschwindend, solange überhaupt nur kleine Abweichungen aus der ursprünglichen Lage betrachtet werden.

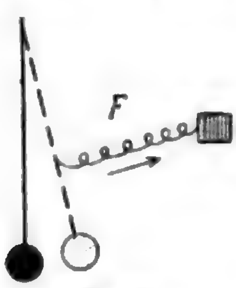


Fig. 34.

Bei elektrischen Systemen ist alles wieder ganz ebenso. Entladeschwingungen erregt man dadurch, daß man das System entweder a) mit elektrischer Feldenergie beladet, indem man durch eine EMK seine elektrische Anordnung ändert, d. h. z. B. seinen Kondensator aufladet; oder b) mit magnetischer Feldenergie beladet, indem man in seiner Leitungsbahn einen elektrischen Strom erregt.

Das ergibt z. B. für einen geschlossenen Kreis folgende prinzipiellen Anordnungen:

a) (Fig. 35). Eine Wippe W verbindet bei Wippenstellung 1 den Kondensator C

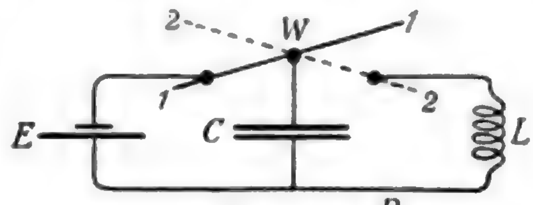


Fig. 35.

mit einer Quelle elektrischer Energie von der EMK E. Dabei wird die elektrostatische Feldenergie $\frac{1}{2} C E^2$ auf C aufgespeichert. Wird jetzt die Wippe in Stellung 2 umgeworfen, so findet im Schwingungskreise LRC die Entladeschwingung statt.

b) (Fig. 36). Die Wippe W schließt in der Stellung 1 die Quelle E durch L kurz

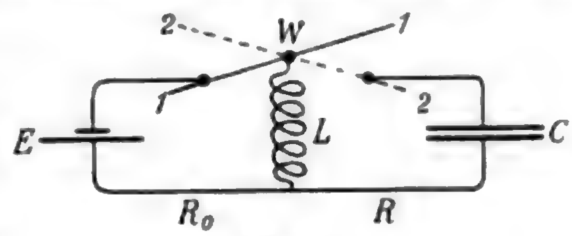


Fig. 36.

und es bildet sich der Strom $J = \frac{E}{R_0}$ aus (R_0 Widerstand der Stromzuleitung). Daher ladet sich das mit L verkettete Magnetfeld mit der Energie $\frac{1}{2} L J^2$. Wirft man jetzt die Wippe rasch genug in die Stellung 2, so entsteht wieder im LRC-Kreise die Entladeschwingung.

c) (Fig. 37). Die Wippe W schaltet in der Stellung 1 in das Schwingungssystem LRC eine EMK E, welche (analog dem Falle c beim Pendel) dem System eine neue Gleichgewichtsanordnung vorschreibt. Es entsteht daher die Ladungsschwingung, nach deren Ablauf die Kapazität C auf die Spannung E geladen erscheint. Wirft man jetzt die Wippe in die Stellung 2, so erfolgt die entsprechende Entladeschwingung.

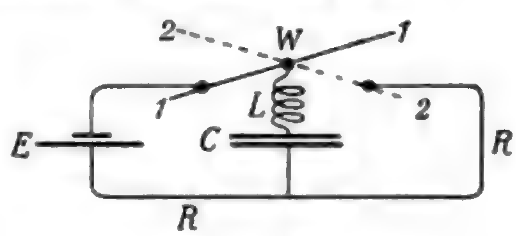


Fig. 37.

In allen drei Fällen eignet sich als Wippe ein elektromagnetisch, nach Art des Wagnerschen Hammers, betätigter Apparat, z. B. ein Saitenunterbrecher oder eine elektromagnetisch betätigte Stimmgabel. Ist die Spannung E hoch, so muß überall für entsprechende Isolation gesorgt werden, die Kontakte der Wippe müssen unter Oel oder dergleichen liegen. Die Schwingungen haben die normalen, Abschnitt **A II 4**, beschriebenen Eigenschaften.

2. Schwingungserregung durch Funken. Verändert man die Schaltung der Figur 35, unter Ersatz der Wippe durch feste Verbindungen, in die Schaltung Figur 38, wo der Schwingungskreis durch eine „Funken-

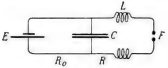


Fig. 38.

strecke" F unterbrochen ist, so erhält man die älteste Methode der Schwingungserregung. Hier bewirken die Eigenschaften der Funkenbahn automatisch dasselbe, was das Hin- und Herwerfen der Wippe im Falle der Figur 35 besorgte. Die Gasbahn der Funkenstrecke wird nämlich, sobald die an den Enden wirksame Spannungsdifferenz einen bestimmten Wert übersteigt, aus einem Nichtleiter zu einem Leiter, so daß in diesem Moment die Entladeschwingung einsetzt. Wie im Artikel „Funkenentladung" auseinandergesetzt ist, hängt die Entladungsspannung und damit die Anfangsamplitude der Entladeschwingung hauptsächlich von der Länge der Funkenbahn ab. Um sie genau einregulieren zu können, dienen die sogenannten Funkenmikrometer (Fig. 39). Außerdem spielt die Form der Funkenelektroden, ob Kugel, Platte, Spitze, sowie die Art und der Druck des umgebenden Gases eine bestimmende Rolle. Bis zu 10 Atmosphären nimmt die Entladungsspannung ungefähr dem Druck proportional zu, weshalb auch die Isolation bei so hohem Druck viel leichter wird (vgl. **A II 5** α, β). Die näheren Vorgänge der Funkenbildung und des Ablaufes der Schwingung im Funken sind im Artikel „Lichtbogenentladung" ausführlich behandelt. Denn der Erregungsfunken der Entladungsschwingung ist, wie dort gezeigt, nichts anderes als ein hochfrequenter Wechselstromlichtbogen. Die Schwingungen, die auf diese Art entstehen, heißen dort „Schwingungen dritter Art". Dort ist auch gezeigt, daß Bedingung für ihr Auftreten ein gewisser Mindestbetrag R_0 des Ladungswiderstandes ist. Wird er kleiner, so wird der Funken inaktiv, d. h. die Funkenbahn bleibt dauernd leitend, es fließt einfach ein Gleichstrom zwischen den Elektroden. Durch Vergrößerung von R_0 über den Minimalwert hinaus läßt sich andererseits die sogenannte Funkenfolge, d. h. die Zahl ζ der in der Sekunde erfolgenden Entladungen sehr fein einregulieren.

Verwendet man bei Schaltung (Fig. 38) eine Wechsel-EMK bei E, von einer Frequenz, die gegen die der Funkenfolge ζ klein ist, so wechselt innerhalb einer Periode die Zeit, die zum Aufladen von C bis zur Entladungsspannung nötig ist. Darum ist dann auch die Funkenfolge eine periodische Funktion der Zeit; mit wachsender EMK nimmt sie zu und nimmt bei sinkender wieder ab. In der Zeit, in der die EMK unterhalb der Entladungsspannung bleibt, bleiben die Entladungen ganz aus (s. Fig. 40, wo jeder Vertikalstrich eine Funkenentladung bedeuten soll). Man erkennt, daß in einem so angeregten System die umgesetzte Schwingungsenergie mit der doppelten Frequenz der erregenden Wechsel-EMK auf- und abfluten muß.

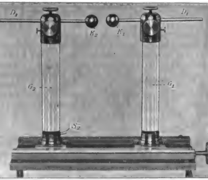


Fig. 39.*

Eine Funkenentladungsbahn entzieht der Schwingung Energie durch Entwickelung einer Gegen-EMK, die eine sehr komplizierte Abhängigkeit vom Stromverlauf hat (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung"), und daher nicht wie bei metallischen Leitungsbahnen = iR gesetzt werden kann. Bei einem Funken ver-

liert daher der Begriff Widerstand seinen eigentlichen Sinn. Wenn man trotzdem häufig von Funkenwiderstand R_f spricht,



Fig. 40.

so meint man damit einen Widerstand, der, an Stelle des Funkens in die Bahn eingeschaltet, bei derselben Schwingung dieselbe Energie verbrauchen würde, wie sie im Funken tatsächlich verbraucht wird. Die Gesetze des Wechselstromlichtbogens (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung") zeigen daß dieser Widerstand in komplizierter Weise mit der Länge der Funkenbahn wachsen muß; daß er mit der Frequenz abnimmt, daß er vom Material und der Form der Elektroden, sowie von der Art und dem Drucke des Gases der Funkenbahn abhängig ist. Eine unterteilte, d. h. aus mehreren hintereinandergeschalteten Strecken bestehende Funkenstrecke hat bei gleicher Gesamtlänge der Entladungsbahn einen größeren Widerstand als eine einfache, und zwar wächst der Widerstand rasch mit der Zahl der Unterteilungen.

Besonders bemerkenswert ist auch die Tatsache, daß der Funkenwiderstand von der Schwingungsamplitude abhängig ist (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung" **B 2 b**), so daß er mit abnehmender Stromamplitude rasch zunimmt. Die Schwingungen in Kreisen mit Funkenstrecken befolgen daher nicht das einfache durch ein logarithmisches Dekrement definierte Abklingungsgesetz. Vielmehr haben Messungen ergeben, daß die Amplituden nach einem linearen Gesetz

$$J = J_0\left(1 - \frac{a}{T}t\right)$$

abnehmen. a heißt das lineare Dekrement. Im Artikel „Schwingungserregung" ist gezeigt, daß daraus ein bestimmter Schluß auf den Verlauf der Funkencharakteristik zu ziehen ist (vgl. auch den Artikel „Lichtbogenentladung" **B 2 b**). Dieses Abklingungsgesetz läßt sich auch so ausdrücken: Das logarithmische Dekrement der Schwingungen ist nicht mehr konstant, sondern wächst rasch in dem Maße, wie die Schwingungen abklingen. Schließlich, bei genügend kleiner Stromamplitude wird es unendlich groß, d. h. die Funkenstrecke wird nichtleitend.

3. Anregung offener Oszillatoren. Für die Anregung der Eigenschwingungen offener Oszillatoren gilt alles Gesagte ohne weiteres mit. Der durch eine Funkenstrecke erregte offene Oszillator ist als Prototyp aller offenen Oszillatoren zuerst von Hertz in seine Schwingungseigenschaft erkannt und von ihm zu seinen klassischen Versuchen über elektrische Schwingungen und die Ausbreitung der elektrischen Kraft benutzt worden (Hertzscher Oszillator).

Die Anregung eines offenen Oszillators durch einen Funken ist die völlige Analogie zu der Erregung von Saitenschwingungen durch Zupfen. Man kann diese Schwingungen unter dem Namen stehende Wellen auch als Interferenzerscheinung zweier von der Zupfstelle aus nach beiden Seiten fortlaufender und an den Saitenenden immer wieder reflektierter Wellen ansehen. Während nun bei dem Zupfprozeß an sich Wellen beliebiger Schwingungszahl von der Zupfstelle ausgehen, trifft der Interferenzprozeß der hin und herlaufenden reflektierten Wellen naturnotwendig eine ganz bestimmte Auslese derjenigen Schwingungszahlen, deren halbe Wellenlänge in der Saitenlänge ganzzahlig teilbar ist; so entstehen beim Zupfen die stehenden Wellen, die man als die Reihe der Eigenschwingungen beobachtet. Die durch den Zupfprozeß in die Schwingung hineingegebene Energie muß sich auf diese Reihe in einer durch die Gesetze der gekoppelten Systeme bestimmten Weise verteilen, wobei es ganz von der Lage der Zupfstelle abhängt, welche von den Eigenschwingungen überhaupt und in welcher Stärke sie erregt werden. Die Oberschwingungen sind mit der Grundschwingung ja fest gekoppelt, insofern dieselben Saitenelemente die Grund- und die Oberschwingungen zu machen haben. Diese Koppelung ist ersichtlich am stärksten, wo eine möglichst große Elongation der Oberschwingung mit einer möglichst großen der Grundschwingung zusammentrifft; d. h. also wo eine Bauchstelle der Oberschwingung dem Bauch der Grundschwingung am nächsten liegt. Sie nimmt von dort an ab, bis sie in den Knotenstellen O wird. Daraus folgt, daß beim Zupfen jedenfalls nie diejenigen Schwingungen erregt werden können, welche an der Zupfstelle einen Knoten haben. Die übrigen nur in dem Maße als sie an der Zupfstelle mit der Grundschwingung gekoppelt sind. So wird z. B. beim Zupfen in der Mitte nur die Reihe 1, 3, 5... der Schwingungen erregt. Zupfen an einer anderen Stelle aber kann die Grundschwingung nie so stark erregen, wie es durch Zupfen in der Mitte geschieht.

Genau so liegen die Verhältnisse beim linearen elektrischen Oszillator. Durch eine Funkenstrecke in der Mitte wird die Reihe 1, 3, 5... der Eigenschwingungen erregt, wobei der Oszillator $^1/_4$, $^3/_4$ $^5/_4$ usw. der Wellenlänge λ ist, mit der sich die betreffende Schwingung längs des Drahtes

fortpflanzt. Da diese Fortpflanzung mit Geschwindigkeit c erfolgt (vgl. Gleichung 49), und für jede Wellenfortpflanzung $\lambda_p n_p = \frac{\lambda_p}{T_p} = c$ gilt, so läßt sich die Gleichung (33) auch schreiben

$$\lambda_p = \frac{2\pi c}{p} \sqrt{\mathfrak{L}_1 \mathfrak{C}_1} \quad \ldots \quad 50)$$
$$p = 1, 2, 3 \ldots$$

Abschnitt **A II 5** c wurde gezeigt, die daß eine Hälfte eines linearen Oszillators stets durch eine große Kapazität ersetzt werden kann. Daher schwingt die Elektrizität in einem Drahte, der durch einen Funken zwischen einem seiner Enden und einer großen Leitermasse erregt wird, genau so wie der doppelt so lange Draht, mit einer Funkenstrecke in der Mitte, in der betreffenden Drahthälfte schwingen würde (vgl. Fig. 41). Wie werden solche halbierte Oszillatoren, deren eine Hälfte durch die Kapazität des Erdkörpers ersetzt ist, in den Antennen der drahtlosen Telegraphie wiederfinden.

4. Anregung gekoppelter Systeme. Stoßerregung durch Löschfunken. Die im Abschnitt **B I 1** und **2** geschilderten Erregungsmethoden finden auch für die Schwingungserregung in der Primärseite der gekoppelten Systeme des Abschnittes **A II 5** d,

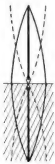


Fig. 41.

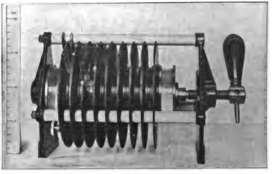


Fig. 43.*

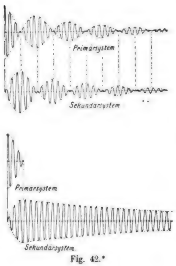


Fig. 42.*

Anwendung, wobei die Vorgänge sich in den dort unterschiedenen Fällen a, b, c qualitativ genau so abspielen, wie auseinandergesetzt. Nur die Erregung mittels eines Funkens modifiziert auch hier den quantitativen Verlauf durch die komplizierte Art der Energieabsorption, die der Funken besitzt. Bei loser Koppelung wird lediglich das Dekrement der Schwingung ähnlich modifiziert, wie es bei den einfachen Systemen nach **B I 2** der Fall ist. Bei festerer Koppelung ist das Dekrement der beiden Hauptschwingungen größer als es durch die Gleichung (47) bestimmt ist; ferner ist nun nicht mehr allgemein die Schwingung mit der größeren Frequenz die stärker gedämpfte, sie ist vielmehr hier meist schwächer gedämpft wie die der kleineren Frequenz.

Die im Abschnitt **B I 2** hervorgehobene, aus den Lichtbogeneigenschaften des Funkens zu erklärende Tatsache, daß mit abnehmender Stromamplitude der Funken schließlich verlöscht, führt, wie M. Wien zuerst zeigte, unter Umständen zu folgendem bedeutsamen Verhalten der mit Funken erregten gekoppelten Systeme: Wir sahen, daß bei einem ge-

koppelten System die in der Primärseite zum Schwingen gebrachte Energie in Form von Schwebungen zwischen der Primär- in der Sekundärseite hin- und herpendeln muß. In dem Maße, wie die Energie in das Sekundärsystem wandert, wird also die Stromamplitude im Primärsystem kleiner und kleiner. Wie im Artikel „Lichtbogenentladung" B 2b auseinandergesetzt ist, wächst dabei die Zündspitze der Funkencharakteristik mehr und mehr in die Höhe, bis unter Umständen der Strom nicht mehr ausreicht, die zum „Ueberklettern der Zündspitze" erforderliche Spannung an den Funkenkugeln hervorzubringen. Damit wird der Primärkreis unterbrochen und scheidet aus dem System aus; ein Zurückfluten der Energie aus Kreis 2 ist unmöglich gemacht. Kreis 2 schwingt daher allein weiter mit der Frequenz und Dämpfung, die ihm als ungekoppeltem Einzelsystem eigen sind.

Figur 42 illustriert an den entsprechenden Schwingungskurven die Verhältnisse. Und zwar zeigen die beiden obersten Reihen den Verlauf der Schwingungen ohne die genannte Wirkung, die beiden untersten mit ihr.

Damit diese sogenannte „Stoßerregung" des Systems 2 durch „Löschfunken" eintreten kann, müssen die Systeme 1 und 2 so beschaffen sein, daß die Stromamplitude in 1 infolge der Schwebungen wirklich klein genug wird. Dazu ist einmal sehr genaue Uebereinstimmung der Eigenfrequenzen ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$) erforderlich, ferner spielen die Anfangsamplituden und Dekremente der beiden Hauptschwingungen ω_a und ω_b eine Rolle, wovon die letzteren nach Gleichung (41a) auch in den Koppelungskoeffizienten eingehen. Was diesen betrifft, so muß man sich erinnern, daß eine Verstärkung der Koppelung eine schnellere Ueberführung der Primärenergie in das Sekundärsystem bedingt, also größeren Wirkungsgrad dieser Uebertragung sicherstellt. Andererseits erfordert das Zustandekommen der Löschwirkung im Funken langsame Schwebungen, also schwache Koppelung So ergibt sich praktisch in jedem Falle ein „kritischer Koppelungsgrad", bei dem man die Erscheinung der Stoßerregung am besten erhält. Die Funkenstrecke selbst muß so beschaffen sein, daß mit abnehmender Stromstärke die Zündspitze ihrer Charakteristik möglichst rasch in die Höhe wächst. Nach der dynamischen Theorie der Lichtbogenentladung ist dies um so mehr der Fall, je mehr dieLichtbogenhysteresis zurückgedrängt wird, wofür im Artikel „Lichtbogenentladung" eine Reihe von Hilfsmitteln angegeben ist. Im wesentlichen kommt es dabei auf eine möglichst intensive Abkühlung der Funkenbahn an, die man durch Anwendung von unterteilten Plattenfunkenstrecken erreicht. Als Material sind Silber und Kupfer wegen ihrer großen Wärmeableitung am besten. Auch Platiniridium ist gut brauchbar. Funkenübergang in Wasserstoff ist als sehr wirksames Mittel zum Zurückdrängen der Hysteresis beim Lichtbogen bekannt und bewährt sich auch hier.

Figur 43 zeigt eine 8fache Löschfunkenstrecke aus silberplattierten Kupferplatten. Der Abstand der einzelnen Silberplatten voneinander ist etwa 0,1 mm, er wird durch zwischengepreßte Glimmerringe erhalten. Die Kupferscheiben sind überstehend als Kühlflächen ausgebildet, um die Wärme rasch an die Luft abzugeben. Gelegentlich bläst man auch Luft durch die Funkenstrecken selbst. Eine recht gute Löschfunkenstrecke bildet auch die Vakuumquecksilberlampe, bei der man nur für möglichst gute Kühlwirkung sorgen muß.

II. Ungedämpfte Schwingungen.

Soll ein System zu ungedämpften Schwingungen, d. h. zu Schwingungen dauernd gleicher Amplitude erregt werden, so muß gesorgt werden, daß die durch Gegen-EMKK dauernd verlorene Energie durch Energiezufuhr dauernd ersetzt wird.

Das kann ohne weiteres aus einer periodischen Energiequelle geschehen; jedoch auch aus einer unperiodischen unter Anwendung besonderer Anordnungen, mit deren Hilfe die Energiezufuhr zu dem Schwingungskreis periodisch „gesteuert" wird.

1. Periodische Energiequelle. 1a) Allgemeine Grundsätze. Das Typische dieses Falles haben wir schon bei den lose gekoppelten Systemen kennen gelernt, in deren Primärsystem eine ungedämpfte Schwingung bestehend angenommen wurde. Dieselbe bewirkt durch die Koppelung eine Wechsel-EMK $e = E \sin \omega t$ im System 2. Von ihr erregt sahen wir schließlich eine dauernde erzwungene Schwingung von der Amplitude

$$J = \frac{E}{\sqrt{\mathfrak{R}_2^2 + \left(\omega \mathfrak{L}_2 - \frac{1}{\omega \mathfrak{C}_2}\right)^2}}$$

im System 2 entstehen (vgl. Gleichung 42).

Im Prinzipe dasselbe erreicht man, wenn man bei den Schaltungen Figur 35 bis 37 an Stelle der Gleichstromquelle E eine Wechsel-EMK, z. B. eine Wechselstrommaschine verwendet. Dann muß natürlich die Wippe W durch feste Verbindungen ersetzt werden und es entstehen folgende Schaltungen:

Figur 44 und 45, die aus Figur 35 und 36 entstehen, sind identisch. Bei ihnen sind die Wechselstromquelle, die Selbstinduktivität $\mathfrak{L}$ und die Kapazität $\mathfrak{C}$ parallelgeschaltet. Die Schaltung dokumentiert sich ohne weiteres

als Koppelung eines einfachen Wechselstromkreises mit einem Schwingungskreise.

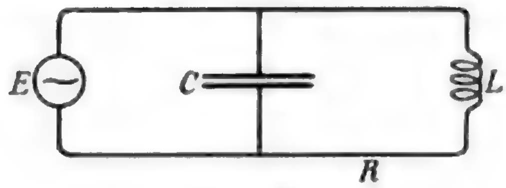


Fig. 44.

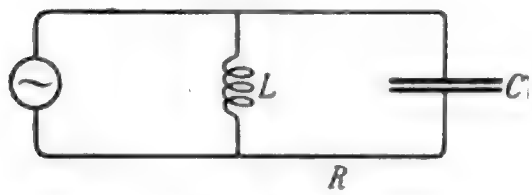


Fig. 45.

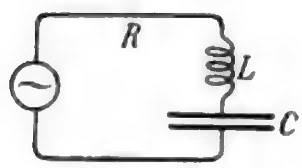


Fig. 46.

Bei Schaltung Figur 46, die aus Figur 38 entsteht, sind Wechselstromquelle, Selbstinduktivität und Kapazität hintereinandergeschaltet. Der ganze Kreis ist identisch mit einem Sekundärsystem, welches mit einem ungedämpften Primärsystem, der Wechselstrommaschine, gekoppelt ist. Alles vollzieht sich somit nach den A II 5d kennengelernten Gesetzen.

Bei allen diesen Schaltungen ist wieder, wie bei den entsprechenden gekoppelten Systemen, der Fall bedeutsam und interessant, wo $\omega \mathfrak{L}_2 = \frac{1}{\omega \mathfrak{C}_2}$ wird, was damit gleichbedeutend ist, daß die Frequenz ω der Wechselstromquelle mit der Eigenfrequenz des Kreises übereinstimmt (Resonanz). Aus Gründen, die im Artikel „Schwingungen (Erzwungene Schwingungen)“ und „Wechselströme“ angeführt sind, bezeichnet man die entsprechenden Vorgänge bei der Schaltung a und b (Fig. 44 und 45) als Stromresonanz, bei der Schaltung c (Fig. 44) als Spannungsresonanz. In beiden Fällen wird dem schwingenden System von der Wechselstromquelle lediglich die in ihm dauernd verbrauchte Energie ersetzt.

Um diese Erregungsweise für die in der drahtlosen Telegraphie erforderlichen hohen Frequenzen anwenden zu können, hat man besondere, prinzipiell von den gewöhnlichen Wechselstrommaschinen nicht verschiedene Hochfrequenzmaschinen konstruiert. Als höchste Frequenz ist auf diese Art mit der Induktionsmaschine von Alexanderson Fessenden etwa $\omega = 500000$ erreicht worden. Höher zu kommen dürfte aber auf diesem Wege ausgeschlossen erscheinen.

Man hat darum nach Prinzipien gesucht, gewissermaßen durch Frequenztransformation die für die drahtlose Telegraphie erforderlichen hohen Frequenzen aus den niedrigen Frequenzen der Wechselstrommaschinen zu gewinnen. Drei Wege sind da beschritten worden:

α) Die Goldschmidtsche Hochfrequenzmaschine: Die gewöhnlichen Wechselstrommaschinen beruhen im Prinzip darauf, daß eine Drahtspule in einem konstanten Magnetfelde so rotiert, daß durch Induktion eine EMK der Rotationsfrequenz ω entsteht. Die Goldschmidtsche Maschine (Schaltungsschema Fig. 47) dagegen nutzt die leicht ersichtliche Tatsache aus, daß die in einem von der Spule S erzeugten Wechselfelde von der Frequenz ω' mit der Frequenz ω rotierende Spule R eine EMK erfährt, die aus den Frequenzen $\omega + \omega'$ und $\omega - \omega'$ zusammengesetzt gedacht werden kann (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegung“). Läßt man die in dem konstanten Feld erregte EMK der Frequenz ω auf einen abgestimmten Schwingungskreis arbeiten, so wird sie eine kräftige Schwingung der Frequenz ω darin erzeugen. Durch Rückwirkung dieser Schwingung auf die feststehende Spule S wird dort eine EMK induziert, die nach dem genannten Prinzip aus den Frequenzen $\omega + \omega = 2\omega$ und $\omega - \omega = 0$ zusammengesetzt angesehen werden

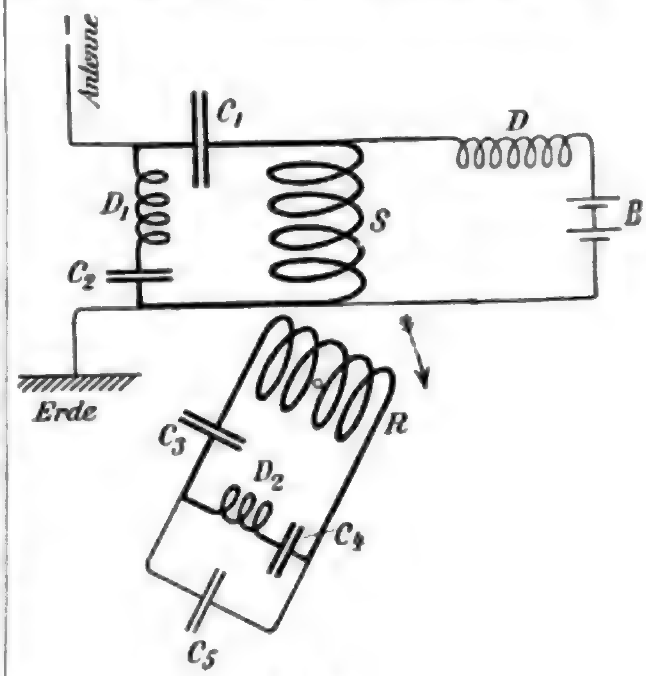


Fig. 47.*

kann. Durch Koppelung eines auf 2ω abgestimmten Schwingungskreises läßt man durch diese EMK der feststehenden Spule eine kräftige Schwingung der Frequenz 2ω überlagern, die dann in der rotierenden Spule zwei Schwingungen $2\omega + \omega = 3\omega$ und $2\omega - \omega = \omega$ induziert. Auch für die Verstärkung der Schwingung 3ω durch Resonanz sorgt man wieder durch Einfügung geeigneter Kapazitäten usf. Man übersieht, daß so eine fortwährende Steigerung der Frequenz möglich ist. Schließlich entnimmt man die Schwingungsenergie von der gewünschten Frequenz der feststehenden Spule, indem man mit ihrem Schwingungskreise einen Kreis der betreffenden Frequenz koppelt. In Figur 47 z. B. einen offenen geerdeten Oszillator als Antenne.

β) Legt man eine sinusförmige Wechselspannung der Frequenz ω an einen Elektromagneten mit Eisenkern an, so erhält wegen des Knies der Magnetisierungskurve des Eisens der entstehende Strom eine Kurvenform von der Grundfrequenz ω, in der aber als Oberschwingung namentlich die Frequenz 3ω stark hervortritt. Ebenso erhält die Klemmenspannung an den Enden des Elektromagneten, durch den man einen sinusförmigen Strom zwingt, eine Kurvenform, in der neben der Frequenz ω, die Frequenz 3ω hervortritt. Durch geeignete Koppelung von Resonanzkreisen lassen sich diese verdreifachten Frequenzen heraussieben, die man durch denselben Vorgang in einem zweiten Elektromagneten wiederum verdreifachen kann, usf. Auf diesem Prinzipe beruht eine von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie konstruierte Hochfrequenzmaschine.

γ) Ganz analog dieser magnetischen Frequenztransformation läßt sich eine galvanische mit jedem Leiter vollziehen, der eine gebogene Charakteristik hat. Läßt man auf ihn eine sinusförmige EMK wirken, so entsteht wieder ein Strom, der vor allem die 3. Oberschwingung enthält, die herausgesiebt werden kann. Ebenso die Klemmenspannung, wenn man einen sinusförmigen Strom aufzwingt. Die Lichtbogenentladung, wie überhaupt die Gasentladungen sind geeignete Leiter dieser Art.

δ) Eine elektrische Frequenztransformation ist nach diesem Prinzip nicht zu erwarten, weil die Kurve der dielektrischen Erregung bei keinem Dielektrikum nicht erheblich von einer geraden Linie abweicht.

2. Unperiodische Energiequelle. Wir gehen wieder aus von den Schaltungen Figur 35 bis 37, die wir durch Einschaltung eines Kommutators K zwischen E und dem Schwingungssystem, unter Ersatz der Wippe durch feste Verbindungen, wie in Figur 48 und 49 gezeichnet, umändern.

Der Kommutator werde mit der Frequenz ω umgeschaltet. Da die Gleichstromquelle in Verbindung mit einem periodisch betätig-

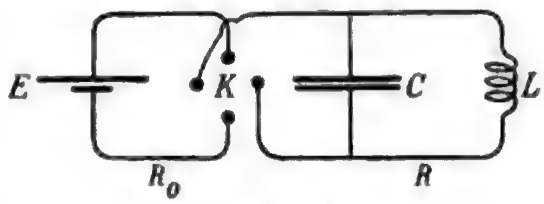


Fig. 48.

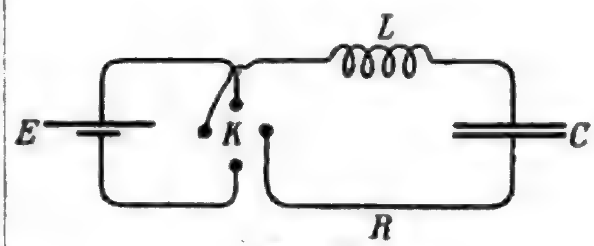


Fig. 49.

ten Kommutator identisch ist mit einer Wechselstromquelle, wobei die Kommutierungsfrequenz ω die Frequenz der Wechsel-EMK bestimmt, so wird hier alles, wie bei den in 1 behandelten Fällen.

Die Umsteuerung, die der mechanisch betätigte Kommutator ausübt, wird ganz automatisch besorgt, wenn man einen Leiter mit fallender Charakteristik F an seine Stelle schaltet; und zwar bei Schaltung Figur 48 in die Stromzuführung (Fig. 50), bei Schaltung Figur 49 zu ihr parallel (Fig. 51).

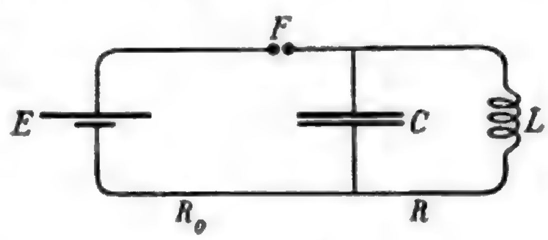


Fig. 50.

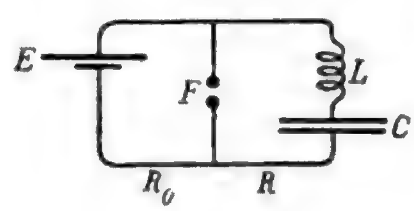


Fig. 51.

Solche Leiter besitzen einen Spannungsabfall, der bei zunehmendem Strom kleiner, bei abnehmendem Strom größer wird, und sie sind dadurch in der Lage, unter dem Einfluß der einmal eingeleiteten Schwingung des Schwingungskreises die zum Ersatz des

Energieverbrauchs der Schwingung nötige Wechselstromenergie dem gekoppelten Gleichstromkreise zu entnehmen. Sie sind gewissermaßen selbsttätige Umformer von Gleichstromenergie in Wechselstromenergie. Das bekannteste und wichtigste Beispiel eines solchen Leiters ist der Gleichstromlichtbogen. In dem Artikel „Lichtbogenentladung" **B 2 f** ist diese Selbsterregung von elektrischen Schwingungen durch eine unperiodische Energiequelle eingehend behandelt. Dort ist auch gezeigt, daß die sogenannte Lichtbogenhysteresis bei dieser Erregungsmethode die Höhe der erreichbaren Schwingungsfrequenzen beschränkt. Um zu den Frequenzen zu gelangen, die man gewöhnlich allein als elektrische Schwingungen bezeichnet, und die z. B. in der drahtlosen Telegraphie gebraucht werden, sind darum besondere Hilfsmittel zur Unterdrückung der Lichtbogenhysteresis anzuwenden. Die dazu führenden Hilfsmittel ergeben sich aus der im Artikel „Lichtbogenentladung" mitgeteilten Theorie.

Bei der Schwingungslampe von Poulsen, die schematisch in Figur 52 dargestellt ist,

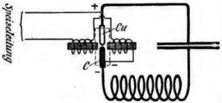
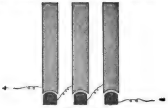


Fig. 52.*

brennt der Lichtbogen in einer Wasserstoffatmosphäre und in einem starken Magnetfeld. Außerdem wird ein unsymmetrischer Lichtbogen zwischen einer positiven Kupfer- und einer negativen Kohleelektrode verwendet, welcher die Rückzündung und damit das Entstehen der Schwingungen 3. Art erschwert Die nach den von H. Th. Simon angegebenen Prinzipien konstruierte Lampe der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie besteht aus einer Reihe hintereinandergeschalteter unsymmetrischer Lichtbogen zwischen starkgekühlten ausgehöhlten Kupferelektroden und Kohlenelektroden (s. Fig. 53), wobei der Lichtbogen wesentlich in den vom Lichtbogen selbst gebildeten Gasen brennt. Die technische Ausführung dieser Grundgedanken wird von verschiedenen Firmen in verschiedenartiger Weise erreicht.

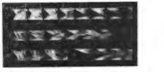

Fig. 53.*

Auch eine Hauptschluß-Gleichstromdynamomaschine, die man an einen Kondensator anschließt, erfüllt prinzipiell die Bedingungen, die für die Selbsterregung von Schwingungen aus einer Gleichstromquelle erforderlich sind. Indessen sind hier praktisch bisher nur Schwingungen niedriger Frequenz erhalten worden.

C. Beobachtung und Messung der elektrischen Schwingungen.

I. Nachweis des Schwingungszustandes.

Die Möglichkeit und Notwendigkeit elektrischer Schwingungen wurde von Helmholtz auf Grund des Energieprinzips in seiner Abhandlung über die Erhaltung der Kraft (1848) ausgesprochen. Den ersten systematischen Nachweis ihrer Existenz führte Feddersen 1861. Die durch Funkenentladung in Kondensatorsystemen erregten Schwingungen studierte er dadurch, daß er das Funkenbild mit Hilfe eines sehr schnell rotierenden Hohlspiegels auseinanderlegte und photographierte. Figur 54 zeigt Beispiele der


Fig. 54.

erhaltenen Bilder, welche den Schwingungscharakter des im Funken fließenden Stromes erkennen und messen lassen. Später wurden noch andere Methoden angegeben, durch die man die Schwingungen von elektrischen Systemen beobachten kann:

a) Das Glimmlicht einer Geißlerschen Glimmlichtröhre G zeigt (vgl. den Artikel „Glimmentladung") eine typische Unsymmetrie, welche die Richtung des Stromdurchganges eindeutig erkennen läßt. Wird die Röhre nach dem Vorgange von Paalzow (1863) durch Anlegen an einen Oszillator, z. B. in der Schaltung Figur 55, von einer schwingenden EMK. betätigt, so zeigt sie eine völlig symmetrische Verteilung des

Lichtes, in dem sich aber mit Hilfe des rotierenden Spiegels das Hin- und Herströmen der Schwingung erkennen läßt.

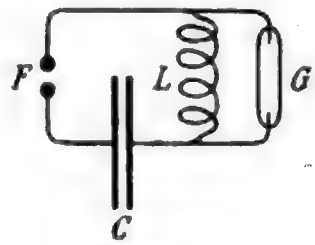


Fig. 55.

β) Wie im Artikel „Elektrische Ventile" gezeigt ist, läßt eine Glimmröhre mit eingeschalteten trichterförmigen Blenden den Strom in der einen Richtung viel leichter passieren, wie in der anderen, sie wirkt als ein elektrisches Ventil (Holtz 1880). Eine solche Holtzsche Doppelventilröhre wie Figur 56

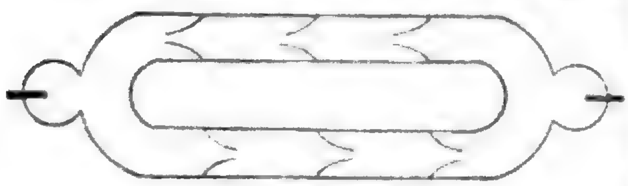


Fig. 56.*

kann wie die Glimmröhre bei dem Paalzowschen Verfahren verwendet werden. Während bei einseitigem Stromdurchgang nur die eine Hälfte der Röhre leuchtet, leuchten im Falle der Schwingungen beide Hälften und der rotierende Spiegel zeigt, daß sie es abwechselnd tun, die eine beim Hin-, die andere beim Herschwingen.

γ) W. v. Bezold zeigte, daß gewisse außergewöhnliche Formen von Lichtenbergischen Figuren sich aus der Tatsache erklären, daß sie durch Schwingungen veranlaßt sind (vgl. den Artikel „Lichtenbergische Figuren"). Indem W. König die Figuren auf einem schnell bewegten Harzkuchen erzeugte, erhielt er eine räumliche Abbildung der Schwingungen.

δ) Schließlich muß der Art gedacht werden, durch die Hertz zuerst auf den Schwingungszustand offener Oszillatoren aufmerksam wurde.

Er experimentierte mit einer Schaltung ähnlich Figur 57. Zwischen zwei Drähten D

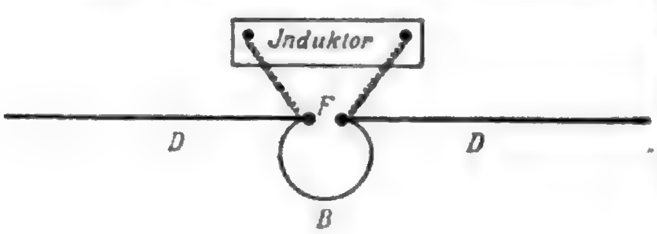


Fig. 57.

wurden an der Funkenstrecke F durch einen Induktor Funken erregt. Wurde dann die Funkenstrecke durch einen Drahtbügel B überbrückt, so verschwanden die Funken nicht, d. h. es blieb eine beträchtliche Spannungsdifferenz zwischen den Funkenkugeln bestehen. Dies konnte nur dadurch erklärt werden, daß B nicht einfach als Ohmscher Widerstand mit dem Spannungsabfall JR auftritt, sondern als Wechselwiderstand mit dem Spannungsabfall $J\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$; daß also ein Wechselstrom in dem System DBD floß; wobei wegen der Kleinheit von L zugleich folgte, daß die Frequenz dieses Stromes sehr groß sein mußte. Dieser unscheinbare Versuch mit seiner genialen Deutung wurde der Ausgang für die glänzende Reihe der Entdeckungen, durch die Hertz das Gebiet der elektrischen Schwingungen erst so eigentlich erschloß und die Aetherphysik experimentell auf ein neues Niveau brachte.

II. Spezielle Beobachtungen und Messungen an elektrischen Schwingungen.

1. Stromstärke. Prinzipiell läßt sich zur Stromstärkemessung jede Methode heranziehen, die überhaupt zur Wechselstrommessung erdacht ist. Wie im Artikel „Elektrischer Strom" nachzulesen ist, scheiden sich alle Strommesser in solche mit linearer und solche mit quadratischer Empfindlichkeit. Bei den ersteren wird eine Stromwirkung ausgenutzt, die eine Funktion des Stromes i direkt, bei den zweiten eine, die eine Funktion des Stromquadrates i^2 ist.

1a) Quadratische Strommesser. Sie zeigen beim Durchgang eines Wechselstromes einen Ausschlag, der den sogenannten effektiven Mittelwert

$$J_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} \quad . \; . \; . \; 51)$$

mißt, der bei sinusförmigem Stromverlauf ($i = J \sin \omega t$) $J_{eff} = \frac{J}{\sqrt{2}}$ ist.

Von den verschiedenen Instrumenten des quadratischen Typs, die zur Wechselstrommessung Anwendung finden, kommen für die hochfrequenten elektrischen Schwingungen fast nur die Hitzdrahtinstrumente in Betracht, d. h. die Instrumente, deren Ausschlag durch die Wärmeentwickelung der Schwingung in einem Drahte bedingt wird. Diese Wärmeentwickelung

$$\text{ist pro Sekunde } Q = \frac{\mathfrak{R}}{T}\int_0^T i^2 dt = \mathfrak{R}(J_{eff})^2 \quad 51a)$$

wo $\mathfrak{R}$ das Widerstandsmoment des Drahtes ist. Da die benutzten Hitzdrähte stets so

kurz sind, daß quasistationäre Stromverteilung in ihnen herrscht, so wird $\mathfrak{R} = R$, dem Ohmschen Widerstand, wenn man für Vermeidung von Skineffekt Sorge trägt. (Vgl. A, II, 5, α, β.) Andernfalls wird $\mathfrak{R}$ auch eine Funktion von ω.

Gilt es eine ungedämpfte sinusförmige Schwingung $i = I \sin \omega t$ zu messen, so wird also

$$Q = RJ_{eff}^2 = R\frac{J^2}{2}, \quad \ldots \text{ 51a)}$$

so daß man J_{eff} und J messen kann, falls R bekannt ist und man Q mißt.

Bei gedämpften Schwingungen

$$i = J\varepsilon^{-\frac{\mathfrak{d}t}{T}} \sin \omega t,$$

deren Amplitudenkurve eine Exponentialkurve ist (vgl. A, II, 4), ist die während des Verlaufs einer Entladung entwickelte Wärmemenge

$$R\int_0^\infty i^2 dt = \frac{\pi}{\omega\mathfrak{d}} R \frac{J^2}{2} = \frac{\pi}{\omega\mathfrak{d}} R(J_{eff})^2 \quad 52)$$

Erfolgen ζ Entladungen pro Sekunde, so ist die in der Sekunde entwickelte Wärmemenge

$$Q = \zeta\frac{\pi}{\omega\mathfrak{d}} R(J_{eff})^2, \quad \ldots \text{ 52a)}$$

so daß aus einem Vergleich mit Gleichung 51a) folgt, daß man hier

$$(J_{eff})^2 = \zeta\frac{\pi J^2}{2\omega\mathfrak{d}} \quad \ldots\ldots \text{ 53)}$$

zu setzen hat.

Hier läßt sich also aus Q und R die Größe $\zeta\frac{\pi}{\omega\mathfrak{d}}\frac{J^2}{2}$ bestimmen. Läßt sich ζ, ω und $\mathfrak{d}$ anderweitig bestimmen, so findet man J. Für die Bestimmung von ω und $\mathfrak{d}$ werden weiter unten besondere Methoden angegeben. Die Entladungszahl ζ kann mit Hilfe des rotierenden Spiegels direkt oder photographisch ermittelt werden. Sehr bequem ist dazu auch der Entladungsanalysator nach Fleming, eine durch einen Elektromotor in Kreisschwingung versetzte, von dem Funkenkreis aus erregte Geißlerröhre (vgl. Fig. 58). Jede Entladung dokumentiert sich durch ein Aufleuchten der Röhre, durch die Rotation der Röhre erscheinen die zeitlich folgenden Entladungen räumlich auseinandergelegt. Nach dem Prinzip der stroboskopischen Methoden (vgl. den betr. Artikel) läßt sich dann ζ ermitteln.

Die verschiedenen auf der Wärmewirkung der Schwingungen beruhenden Meßanordnungen für elektrische Schwingungen unterscheiden sich durch die Art, wie sie die entwickelte Wärme Q zur Anzeige bringen.

α) Hitzdrahtinstrumente. Die Hitzdrahtinstrumente von Hartmann und Braun tun das dadurch, daß sie die durch

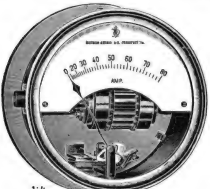


Fig. 58.*

die Erwärmung auftretende Verlängerung und Durchbiegung des gespannten Hitzdrahtes auf einen Zeiger übertragen. Um den Skineffekt zu vermeiden und doch den für starke Ströme erforderlichen Leiterquerschnitt zu erreichen, spannen sie eine Reihe von gleichartigen dünnen Hitzbändern auf der Oberfläche einer Trommel aus, von denen nur eins seine Durchbiegung auf den Zeiger überträgt (Fig. 59). Die Skala der für ganz kleine Stromstärken verwendeten Instrumente gibt aus später ersichtlichen Gründen oft statt J_{eff} in Ampere, die im Instrument verbrauchte Leistung $J_{eff}^2 R$ in Watt an. Die empfindlichsten Instrumente dieser Art haben ihren maximalen Ausschlag bei nur 0,015 Watt.

β) Hitzdrahtluftthermometer. Das nach dem Vorbild von Rieß von F. Braun in die drahtlose Telegraphie eingeführte Hitzdrahtluftthermometer mißt Q durch die Wärmeausdehnung, den der Hitzdraht an einem durch einen verschiebbaren Flüssigkeitsfaden abgeschlossenen Gasvolumen hervorbringt.

γ) Bolometer und Barretter. Beim Bolometer und Barretter wird Q durch die Widerstandsänderung gemessen, die der Hitzdraht durch die Temperaturerhöhung erfährt. Das geschieht entweder in der direkten Wheatstoneschen Brückenschaltung (Figur 60) oder nach Paalzow und Rubens in der



1:4

Fig. 59.*

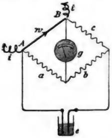


Fig. 60.*

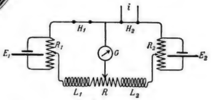


Fig. 62.

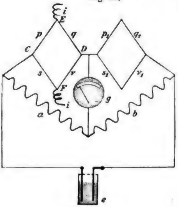


Fig. 61.*



Fig. 63.

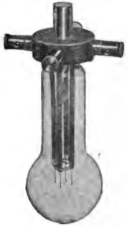


Fig. 64.*

Doppelbrücke (Figur 61) oder nach Bela Gati in der Schaltung Figur 62. Der Weg der Schwingungen i ist jedesmal durch die angehängten mit i bezeichneten Leiterenden gekennzeichnet. Diese Instrumente gestatten bei Verwendung äußerst dünner Drähte, eventuell im Vakuum, noch eine Wärmezufuhr von der Größenordnung 10^{-5} bis 10^{-6} Watt zu messen.

δ) Thermoelement. Die Messung von Q mit Hilfe von Thermoelementen hat zuerst Klemenčič eingeführt. Er vereinigte mit dem Hitzdraht die Lötstelle eines Thermoelementes, indem er in den Schwingungskreis eine Anordnung wie Figur 63 einschaltete. D D sind die Drahtenden, die zum Schwingungskreise führen. Die dünnen Drähte a und b aus thermoelektrisch verschiedenem Material führen, eventuell durch Drosselspulen, zum Galvanometer. Figur 64 zeigt eine moderne Anordnung dieser Art, wobei Hitzdraht und Thermoelement, zur Erhöhung der Empfindlichkeit nach Lebedew, ins Vakuum gesetzt sind. — Das Thermogalvanometer von Duddell vereinigt Hitzdraht, Thermoelement und Galvanometer

zu einem einzigen Instrument in folgender Weise (s. Fig. 65): Unmittelbar über dem Hitzdrahte, aber ohne direkte Berührung mit ihm, befindet sich das sehr feine Thermoelement Bi/Sb, welches durch die Drahtschleife L geschlossen ist. Diese Drahtschleife hängt an einem Quarzfaden in dem Felde eines Magneten NS. Wird der Hitzdraht erwärmt, so entsteht in der Schleife ein Thermostrom, und die Schleife wird von dem Magnetfeld gedreht. Der Spiegel M dient zur Ablesung. Diese Instrumente gestatten in sehr zuverlässiger und bequemer Weise Messungen von Q bis zur Größenordnung 10^{-8} Watt, Stromstärken bis zur Größenordnung 10^{-8} Amp. herunter.

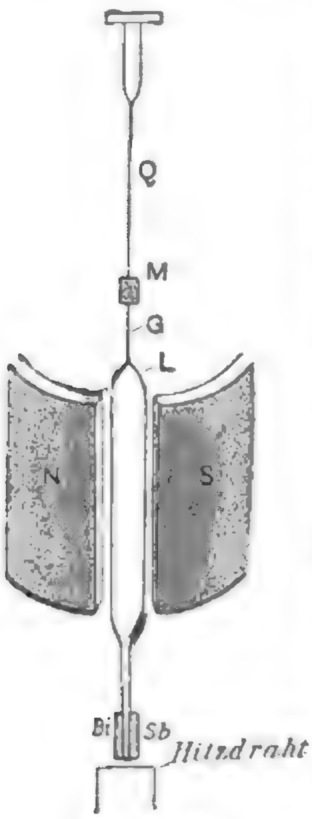


Fig. 65.*

ε) Antikohärer. Auf Wärmewirkungen der Schwingungen beruhen auch die sogenannten Antikohärer. In den Stromkreis einer Gleich-EMK. sind sehr kurze elektrolytische Unterbrechungsstellen eingeschaltet, an denen der Gleichstrom durch Elektrolyse sehr feine Metallbrücken ausbildet. Die Schwingungen zerstören diese Brücken, was sich durch Stromsprünge im Antikohärerkreise kundgibt.

Auch die weiter unten zu besprechenden Thermodetektoren gehören wohl zum Teil hierher, doch ist ihr Verhalten noch nicht befriedigend aufgeklärt.

1b) Lineare Strommesser. Lineare Strommesser können beim direkten Durchleiten von Wechselstrom keinen Ausschlag zeigen. Da sie indessen zu weit höherer Empfindlichkeit gebracht werden können (bis 10^{12} Amp.) wie die quadratischen Instrumente, so hat man sie indirekt zur Stromstärkemessung der elektrischen Schwingungen herangezogen.

Dieses Bestreben ist schon im vorigen Absatz bei allen bolometrischen und thermoelektrischen Methoden erkennbar, wo mittelbar die Empfindlichkeit der linearen Instrumente voll ausgenutzt wird.

Von den linearen Instrumenten hat besonders das Saitengalvanometer in der drahtlosen Telegraphie Bedeutung gewonnen zum Beobachten der durch Schwingungen übermittelten Zeichen, weil es auf relativ einfache Weise gestattet, die Ausschläge auf einem schmalen Streifen photographischen Papiers zu registrieren.

Zu den linearen Instrumenten gehört auch das Telephon, welches wohl in der Praxis der drahtlosen Telegraphie das meistbenutzte Schwingungsbeobachtungsinstrument ist.

α) Gleichrichtung der Schwingungen. In unmittelbarer Weise kann die Empfindlichkeit der linearen Instrumente zur Schwingungsmessung ausgenutzt werden, indem man die Schwingungen zunächst gleichrichtet und sie dann in der gleichgerichteten Form in die Instrumente schickt. Prinzipiell können dazu alle Gleichrichtermethoden verwendet werden, die im Artikel „Elektrische Ventile" behandelt sind, soweit sie ihre Ventilwirkung auch bei hohen Frequenzen beibehalten. Eine auf die Unsymmetrie der Leitercharakteristik gegründete, von Brandes angegebene phänomenologische Theorie aller Gleichrichter ist dort Abschnitt 4 gegeben. Auch die prinzipiellen Schaltungen zur Messung sind dort zu finden.

Folgende spezielle Ventilformen haben sich für die Messung elektrischer Schwingungen besonders bewährt:

Das glühelektrische Ventil, welches zuerst von Fleming für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie eingeführt wurde. Eine von de Forest unter dem Namen „Audion" eingeführte, wie es scheint, besonders günstige Form der Benutzung ist die in Figur 66 abgebildete. Ein von der Hilfsbatterie E_2 gelieferter, von der Glühelektrode F aus in das Meßinstrument T gesandter Grundstrom erfährt eine Verstärkung durch diejenige Phase der an dem Drahtnetz N und dem Glühfaden F wirkenden Schwingung, die den Glühfaden zur Kathode macht; die andere Phase wird abgedrosselt.

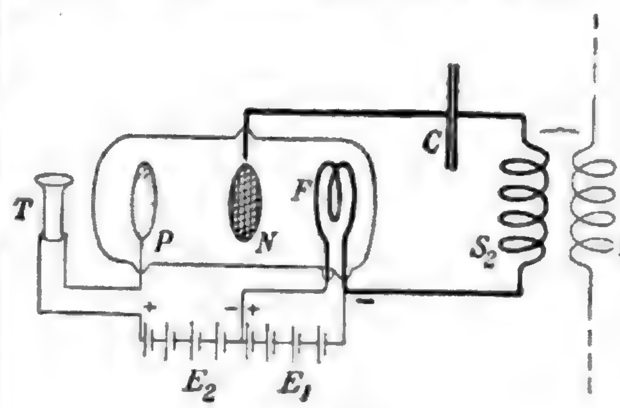


Fig. 66.*

Auch die Lichtbogenventile (Quecksilbergleichrichter), sowie die lichtelektrischen Ventile sind brauchbar bis zu hohen Frequenzen hinauf.

Ferner haben sich hier vor allen Dingen die schon genannten Thermodetektoren bewährt, die gerade aus der Verwendung für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie ihre Entwickelung genommen haben. F. Braun hat ihre Ventilwirkung 1901 zuerst am Psilomelan entdeckt und sie als Detektor der elektrischen Schwingungen empfohlen. Näheres über sie vgl. in dem Artikel „Elektrische Ventile" 4.

Wird eine durch ein solches Ventil gleichgerichtete Schwingung durch ein lineares Strommeßinstrument geschickt, so zeigt der Ausschlag desselben den arithmetischen Mittelwert

$$J_{ar} = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i dt \quad . \quad . \quad . \quad 54)$$

des Stromes an. Für ungedämpfte Schwingungen $i = J \sin \omega t$ wird

$$J_{ar} = \frac{2}{\pi} J \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 54a)$$

Haben wir aber wieder eine Folge von ζ gedämpften Schwingungen $i = J\varepsilon^{-\frac{\mathfrak{d}}{T}t}\sin\omega t$ in der Sekunde, so ist

$$\int_0^\infty i dt = \frac{4J}{\omega\mathfrak{d}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 55)$$

die bei einem gleichgerichteten Schwingungskomplex durch das Instrument geführte Elektrizitätsmenge. Also (wenn $\frac{1}{\mathfrak{d}}$ klein gegen 1 ist)

$$\zeta \frac{4J}{\omega\mathfrak{d}} = J_{ar} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 55a)$$

die in der Sekunde hindurchgeführte Elektrizitätsmenge, welcher der Ausschlag entspricht. Dieser ist somit hier ebenso wie bei den quadratischen Instrumenten dem ζ proportional (vgl. Gleichung 55).

Hier ist er aber der Anfangsamplitude J, dort dem Quadrate J^2 derselben proportional. Werden die zu messenden Schwingungen nach der Funken- oder Stoßerregungsmethode mit Hilfe von Wechselspannung erzeugt, so flutet, wie S. 1071 Figur 40 gezeigt wurde, ζ innerhalb jeder Halbperiode der Wechselspannung auf und ab. Daher muß in diesem Falle die Wirkung in dem Strommeßinstrument periodisch auf- und abfluten, und zwar mit der doppelten Frequenz, wie die der erregenden Wechselspannung ist.

β) Das Telephon. Tönende Funken. Dies ist besonders wichtig bei der Anwendung eines Telephons als Meßinstrument. Das Telephon ist an sich ein lineares Meßinstrument, kann also mit einem Gleichrichter zusammen unmittelbar zur Beobachtung der Schwingungen dienen. Wird dann die geschilderte Erregungsweise mit Wechselspannung genügend hoher Frequenz (ω = ca. 3000) gewählt, so entsteht in dem Telephon ein Ton dieser Frequenz. Man nennt diese Methode die Methode der tönenden Funken. Sie ist in Verbindung mit der Stoßerregung durch Löschfunken von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie eingeführt worden.

Bei einer von C. Lorenz angegebenen Modifikation werden die Erregungswechselströme mittels der Duddellschen Lichtbogenmethode statt mittels einer Wechselstrommaschine erzeugt.

Folgen die Erregungsfunken mit zu kleiner Entladungszahl, was z. B. bei Erregung mit Unterbrechern oder mit 50 periodigem normalem Wechselstrom der Fall ist, so entstehen keine Töne, sondern Geräusche, deren spezielle Art sowohl von der Entladungszahl ζ, wie den Eigenschwingungen der betreffenden Telephonmembran bestimmt wird.

Auch bei der Bolometer- und Barrettermethode kann das Telephon an Stelle eines Galvanometers verwendet werden. Werden dann die Hitzdrähte von tönenden Funkenschwingungen erregt, so flutet in ihnen die entwickelte Wärme mit der doppelten Periode der erregenden Wechselspannung auf und nieder. Sind sie fein genug, um in ihrer Temperatur diesem Wechsel zu folgen, so wird auch hier ein Ton im Telephon entstehen.

Diese Telephonmethode ist die empfindlichste Beobachtungsmethode für elektrische Schwingungen, die es gibt. Neuerdings ist es überdies gelungen, die Töne der Beobachtungstelephone durch Telephonrelais oder Lautverstärker mit gesteigerter Intensität hörbar zu machen.

Die Telephonmethode kann dadurch zu einer vielfach brauchbaren, wenn auch nicht sehr genauen Meßmethode gemacht werden, daß man zu dem Telephon Ohmschen Widerstand parallel schaltet und seinen Betrag verringert, bis die Telephontöne verschwinden (Parallelohmmethode).

γ) Tikkermethode. Um die offenbaren Vorteile der telephonischen Beobachtung von Schwingungen in Form eines Tones auch für die Messung ungedämpfter (eventuell auch durch Gleichspannungsfunken erregter Schwingungen [ζ = const]) auszunutzen, dienen die sogenannten Tikkerschaltungen. Ein Tikker ist ein elektromagnetisch betätigter Unterbrecher von so hoher Unterbrechungsfrequenz, als zu einer Tonbildung im Telephon erforderlich ist. Figur 67 U zeigt ihn in der Schaltung, in der er die Energie der unge-

dämpften Schwingungen des stark ausgezogenen Kreises dem Indikator J und damit dem angelegten Hörer stoßweise, d. h. ton-

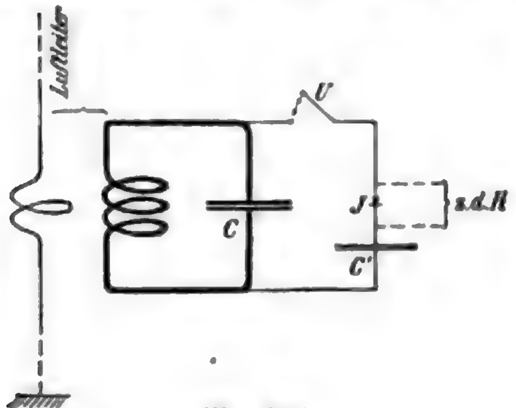


Fig. 67.*

bildend zuführt. Als Indikator J kann so ziemlich jeder der früher genannten verwendet werden.

Ein sinnreicher Gedanke von V. Poulsen macht den Indikator völlig entbehrlich. Es handele sich darum, die von einem Luftleiter (Fig. 68) aufgenommenen

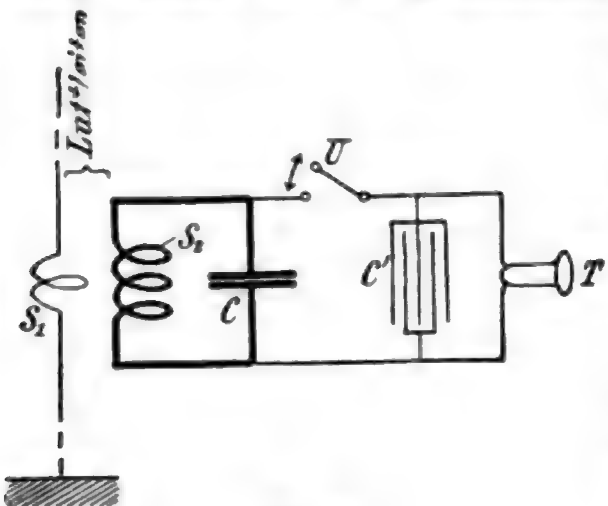


Fig. 68.*

ungedämpften Schwingungen zu beobachten. Man läßt zunächst den gekoppelten Schwingungskreis S_2 sich einschwingen, d. h. die Energie in ihm aufspeichern. Nun wird durch den Tikkerunterbrecher U eine große Kapazität C' eingeschaltet, welche die gesamte aufgespeicherte Energie in einem Stromstoße aufnimmt und nach Oeffnen von U durch das Telephon entladet. Die häufige Wiederholung des Vorganges führt zur Tonbildung. Diese Schaltung arbeitet mit geringeren Verlusten als die Schaltung der Figur 67, sie ist daher äußerst empfindlich. Zuverlässig arbeitende Tikker zu konstruieren, ist indessen eine ziemlich schwierige Aufgabe. Ein auf einer rotierenden Metallwalze schleifender Draht, der dabei vermutlich mit großer Frequenz auf- und abhüpft, hat sich sehr als Tikker bewährt. Die Anordnung heißt „Schleifer".

c) Marconis Magnetdetektor beruht ebenfalls auf einer Stromwirkung der Schwingungen: Ein frisch magnetisierter Stahldraht D verliert, wenn man ihn in eine von gedämpften Schwingungen durchflossene Spule S_1 steckt, einen Teil seiner Magnetisierung (Näheres über diesen Vorgang s. E. Madelung, Ueber Magnetisierung durch schnellverlaufende Ströme, Ann. d. Phys. 17, 861, 1905). Das läßt sich durch einen Induktionsstoß erkennen, der durch diese Aenderung der Magnetisierung in einer zweiten übergeschobenen Spule S_2 erregt wird. Figur 69 zeigt eine Anordnung, durch die Marconi diesen Vorgang zu einem stets bereiten Detektor ausgestaltet hat. Der Stahldraht D wird dauernd durch das Feld der Magnete H H hindurchbewegt und ist in der Spule stets im frischmagnetisierten Zustand.

2. Spannung. Für die Messung hochfrequenter Spannungen gilt Analoges wie für die Messung der Stromstärke: quadratische Instrumente können direkt, lineare mit Hilfe der elektrischen Ventile verwendet werden (vgl. den Artikel „Elektrische Spannung"). Allerdings kommen bei fast allen Methoden bei wachsender Frequenz mehr und mehr Schwierigkeiten auf, weil die Instrumente und ihre Zuleitungen durch ihre Kapazität den zu messenden Schwingungskreis mehr und mehr stören.

Außerdem gibt es eine Reihe spezifischer sehr empfindlicher Beobachtungsmethoden elektrischer Schwin-

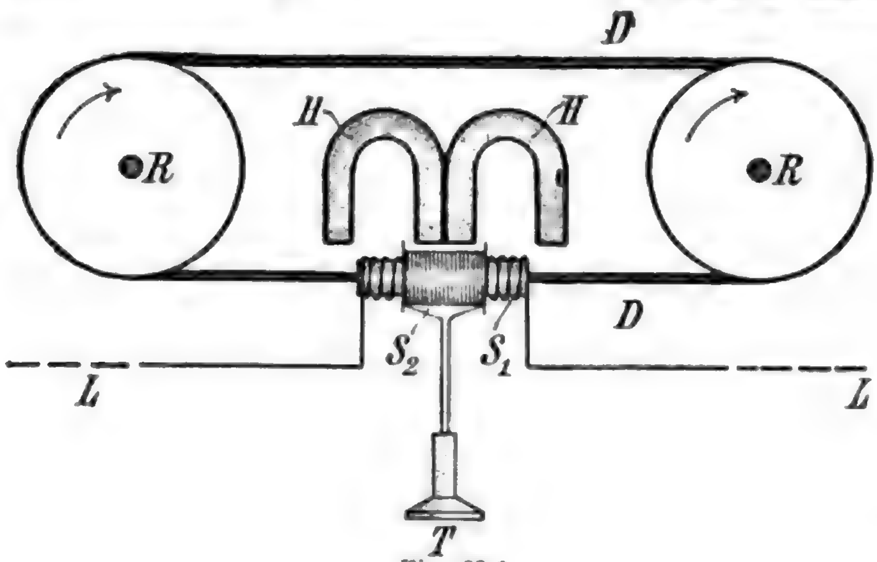


Fig. 69.*

gungen, die sich sicher im wesentlichen auf eine Spannungswirkung der elektrischen Schwingungen gründen.

Das allgemeine Prinzip dieser Methoden ist folgendes: Wenn ein Leiter eine Charakteristik hat, wie in Figur 70 schematisch

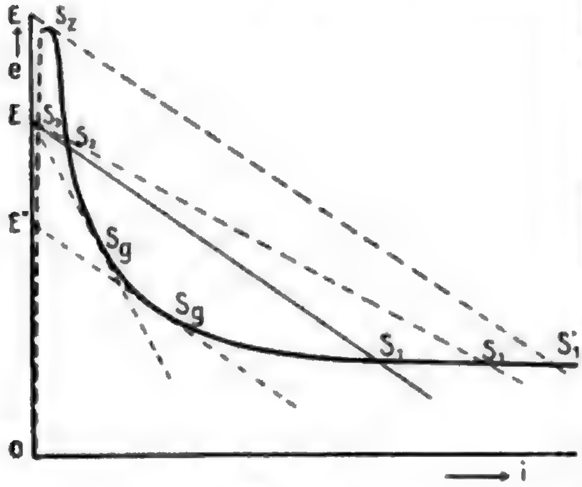


Fig. 70.

angedeutet ist, und man legt ihn mit einem Vorschaltwiderstande R an eine E M K E, so werden die möglichen Stromzustände durch die Schnittpunkte S der Charakteristik mit der sogenannten Widerstandslinie E—iR dargestellt (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung" A 2 b). Von diesen Schnittpunkten entsprechen S_1 und S_3 stabil realisierbaren Stromzuständen, während S_2 einen labilen Zustand anzeigt. Macht man E größer und größer, so rückt die Widerstandslinie sich selber parallel in die Höhe, bis sie schließlich auf dem Gipfel die Charakteristik tangiert und damit S_3 mit S_1 in S_z zusammenfließt. Dadurch wird der Stromzustand labil und springt in den durch S'_1 bezeichneten stabilen Zustand. Man kann das auch so ausdrücken, daß man sagt, der Widerstand des Leiters springe bei genügend hoher Spannung plötzlich von einem hohen auf einen niederen Wert, so daß der Strom sich sprunghaft vergrößert.

Man denke sich jetzt an den Leiter eine solche Gleichspannung angelegt, daß S_3 gerade noch stabil vor dem Gipfel liegt. Wird nun die Spannung nur um ein geringes erhöht, so tritt der Sprung auf S'_1 ein und damit die plötzliche Stromerhöhung in dem Kreise. — Bewirkt man die Spannungserhöhung durch elektrische Schwingungen, die man dem Kreise überlagert, so lösen diese also in sehr empfindlicher Weise eine sprunghafte Stromvermehrung aus.

Durch Vermittelung dieses Stromsprunges lassen sich so noch sehr schwache Schwingungen in auffälliger Weise zur Wahrnehmung bringen.

Leiter mit der erforderlichen Charakteristik gibt es folgende:

α) Kohärer oder Fritter. Sie bestehen aus lose zwischen Elektroden übereinandergeschichteten Metallkörnern. An den Berührungsstellen der Körner scheint eine Oxydhaut die direkte metallische Berührung zu verhindern, bis eine genügend hohe Spannung, infolge der bei der Dünnheit der Oxydschichten sehr großen elektrostatischen Anziehungskräfte, die Oxydschicht zerpreßt und direkte metallische Berührung erzwingt. Dieser Kohärer muß stets durch Klopfen wieder in den schlechtleitenden Zustand zurückversetzt werden (Entfrittung). Verwendung von Quecksilbertröpfchen zwischen Metall- oder Kohleelektroden gestattet Kohärer zu konstruieren, die sich gleich wieder selbst entfritten. Auch die mit geschichteten Kohlekörnern nach Art der Körnermikrophone erhaltenen Kohärer entfritten sich selbst.

β) Gasentladungsstrecken. Wie im Artikel „Lichtbogenentladung" gezeigt ist, besitzt auch eine Gasentladungsstrecke eine Charakteristik, wie sie hier verlangt wird. Daher läßt sich auch jede Gasentladungsstrecke oder Gasentladungsröhre als Detektor im Sinne dieses Abschnittes verwenden. So hat Zehnder eine Glimmröhre konstruiert (Fig. 71), welche elektrische Schwingungen in LL durch das Einsetzen eines durch eine Gleichspannung A vorbereiteten Glimmstromes anzeigt. Ferner läßt sich in einer durch Gleichspannung vorbereiteten Lichtbogenstrecke durch übergelagerte Schwingungen der Lichtbogen entzünden.

Hier bildet die Lichterscheinung, von welcher der Sprung der Stromstärke begleitet ist, ohne weiteres die sekundäre Wirkung, durch die man den Schwingungszustand erkennt.

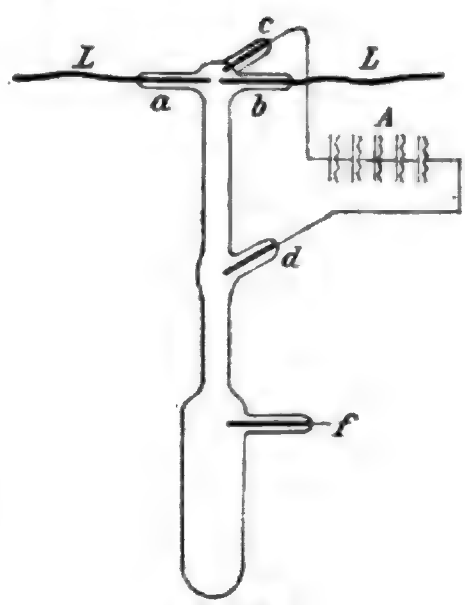


Fig. 71.*

Auch ohne daß die Hilfsgleichspannung E angelegt wird, leisten die Gasentladungsstrecken und Glimmlichtröhren hervorragende Dienste als Schwingungsdetektoren. Und zwar hilft dazu dieselbe durch ihre dynamische Charakteristik beschriebene Eigenschaft, durch die sie zur Erregung von Schwingungen so tauglich befunden wurden. Wirkt nämlich eine Wechselspannung genügender Amplitude an den Enden einer solchen Strecke, so wirkt die Entladungsstrecke zunächst wie ein Kondensator, der sich aufladet, bis die Widerstandslinie mit wachsendem E den Gipfel der Charakteristik erreicht. Nun setzt die Stoßionisation ein und die ganze aufgesammelte Elektrizitätsmenge stürzt sich in die Entladungsbahn und erregt dort die mit den Ionisierungsvorgängen verknüpfte Leuchterscheinung. Wegen der Hysteresis der Gasentladungsphänome (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung") wirkt für den weiteren Verlauf die Gasstrecke wie ein guter Leiter, um so mehr, je höher die Frequenz der Wechselspannung ist und je größer ihre Amplitude ist. Ist die Wechselspannung gedämpft, so wird nach einiger Zeit das Leuchten aufhören, bis eine neue Schwingung es wiederum hervorruft. Namentlich mit Neon und Helium gefüllte Geißlersche Röhren bilden in dieser Weise ein sehr empfindliches Reagens auf Wechselspannungen, wie sie von elektrischen Schwingungen hervorgerufen werden. Die **B II 1 a** beschriebene Methode des Schwingungsanalysators benutzt solche von den Schwingungen erregte Leuchtröhren.

Auch eine kleine Funkenstrecke zwischen Kugel und Spitze (am besten Graphit) läßt sich in sehr empfindlicher Weise zur Schwingungsbeobachtung verwenden, indem man sie in einen von den Schwingungen durchflossenen Oszillator einschaltet. Hertz hat eine solche in einen kreisförmigen Oszillator (Hertzschen Resonator) eingeschaltete Funkenstrecke bei seinen klassischen Versuchen verwendet. Righi erweiterte sie in das Gebiet sehr hoher Frequenzen, indem er als Oszillatoren auf Glas niedergeschlagene Silberstreifen benutzte, in die er einen feinen Riß als Funkenstrecke zur Beobachtung des Schwingungszustandes einschaltete.

γ) Der elektrolytische Detektor von Schlömilch gehört ebenfalls in diese Kategorie, nur daß noch eine übergelagerte Ventilwirkung den Auslösevorgang begünstigt. (Vgl. den Artikel „Elektrische Ventile" 4 Schluß.)

3. Zeitlicher Verlauf von Strom und Spannung. Er wird gemessen mit Hilfe:

a) Der Braunschen Kathodenstrahlröhre (vgl. den Artikel „Elektrischer Strom"), bei der die magnetische oder elektrostatische Ablenkung eines Kathodenstrahlbündels durch die Schwingungen auf einem Fluoreszenzschirm sichtbar gemacht und mit Hilfe eines rotierenden Spiegels oder dergl. zeitlich auseinander gelegt wird. Figur 72 zeigt die von Zenneck mittelst einer Braunschen Röhre erhaltene photographische Registrierung einer gedämpften Schwingung. Die Braunsche Röhre hat bei der Erforschung der elektrischen Schwingungen schon unschätzbare Dienste geleistet.

b) Der Gehrckesche Glimmlichtoszillograph. Sein Prinzip ist ebenfalls im Artikel „Elektrischer Strom" auseinandergesetzt. Figur 28 zeigte z. B. den mit seiner Hilfe photographisch registrierten Schwingungsverlauf in den beiden Kreisen eines gekoppelten Systems (nach Diesselhorst).

Bei diesen Messungen ergibt sich sogleich auch Dämpfung und Frequenz der Schwingungen mit, wenn man die Tourenzahl des zu der Zerlegung benutzten rotierenden Spiegels mißt.

4. Die Strom- und Spannungsverteilung z. B. in linearen Oszillatoren ergibt sich durch

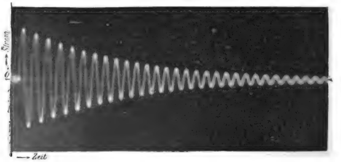


Fig. 72.*

sinngemäße Anwendung der unter 1 und 2 behandelten Methoden auf die verschiedenen Stellen des Oszillators. Die Stromverteilung z. B. durch Einschaltung eines Hitzdrahtinstrumentes an verschiedenen Stellen des Oszillators. Die Spannungsverteilung wenigstens qualitativ durch das Leuchten von Glimmröhren, die man an die verschiedenen Stellen heranbringt oder anhängt.

So gelingt es z. B. mit Hilfe von Geißlerschen Röhren leicht die Spannungsbäuche und damit die Wellenlänge λ der unter A II 5 d β genannten Lecherschen Drahtsysteme nachzuweisen. Falls die Drähte in Luft verlaufen, gestattet dann die Beziehung

$$\frac{\lambda}{T} = c_0 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 54)$$

(c_0 = Lichtgeschwindigkeit) die Schwingungszeit zu messen. Vergleicht man mit der in Luft gemessenen Wellenlänge λ_0 die Wellenlänge λ, welche dieselbe Schwingung besitzt, wenn das Drahtsystem in einem anderen Medium (z. B. einer Flüssigkeit) verläuft, so ergibt

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{c}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \quad . \; . \; . \; . \quad 58)$$

(vgl. Gleichung 49) das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten (das Brechungsverhältnis) für die betreffende Schwingung.

Wenn die Spannungen groß genug gemacht werden können, zeigt sich ihre Verteilung im Dunklen schon direkt durch Glimmbüschel, die von den Drähten ausgehen. Hierauf beruht eine von Seibt angegebene schöne Methode zur Demonstration der in langen Drahtspulen möglichen Eigenschwingungen: Die einseitig geerdete Spule wird durch Koppelung mit einem durch Funken erregten abstimmbaren Kondensatorkreis im Bauche des Stromes angeregt. Der Spule entlang ist ein geerdeter dünner Draht gespannt. Stimmt man den Kondensatorkreis auf die Grundschwingung oder die 3., 5. usw. Oberschwingung ein, so zeigt sich die entsprechende Spannungsverteilung (vgl. Fig. 4) durch Büschelentladungen, die von den Spannungsbäuchen aus zu dem geerdeten Draht übergehen. Figur 74 illustriert das für die 5. Oberschwingung.

5. Leistungsmessungen lassen sich nach der Elektrometermethode (vgl. den Artikel „Elektrische Leistung" 4 b) durchführen. Besonders scheint das Binantelektrometer von Dolezalek geeignet zu sein. Will man z. B. die in einem Teil ab des Schwingungskreises Figur 75 verbrauchte Energie messen, so schaltet man wie in der Figur angedeutet: die beiden festen Binanthälften werden mit den Enden von a und b verbunden, die beiden Nadelhälften mit den Enden eines rein Ohmschen Widerstandes R, der von der Schwingung mit durchflossen wird. Hohe Frequenz macht viele Vorsichtsmaßregeln nötig, um Fehler zu vermeiden.



Fig. 74.*

Eine Art von Energiemessung ist auch folgende Substitutionsmethode zur Ermittelung der Funkendämpfung, also der Energie, die in einer Funkenstrecke verbraucht wird: Man schaltet die Funkenstrecke in einen Schwingungskreis großer Kapazität, der durch eine besondere Funkenstrecke F erregt wird, und dessen Stromstärke J_{eff} man an einem Hitzdrahtinstrument abliest. Nun ersetzt man die Funkenstrecke durch Ohmschen Widerstand R, bis das Amperemeter wieder denselben Ausschlag zeigt. Dann ist $(J_{eff})^2 R$ der Energieverlust im Funken, woraus

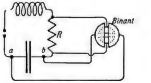


Fig. 75.

sich das Funkendekrement bestimmen läßt.

6. Messungen, die sich auf die Resonanzgesetze stützen.

a) Wellenmesser. Ein mit einem Schwingungskreise sehr lose gekoppelter Hilfskreis, dessen Frequenz stetig variiert werden kann, gestattet eine Reihe von wichtigen Messungen an dem Schwingungskreise vorzunehmen. Und zwar entweder in passiver Benutzung, indem man die von dem zu messenden Kreise aus in dem Hilfskreis erzwungene Schwingung beobach-

tet, oder in aktiver, indem man den Hilfskreis selbst zum Schwingen bringt und die von ihm aus in dem zu messenden Kreise erzwungene Schwingung beobachtet. Solche Hilfskreise aus den unter **A II 5** α, γ genannten Variometern und den nötigen Meßinstrumenten kombiniert sind unter dem Namen Wellenmesser für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie unentbehrliche Meßinstrumente geworden. Im Prinzip sind sie alle identisch; praktisch unterscheiden sie sich z. B. dadurch, daß die einen die Variation der Frequenz durch einen Drehkondensator (Fig. 10), die anderen durch ein Selbstinduktionsvariometer (Fig. 12), noch andere durch eine mechanisch gekoppelte Kombination beider bewirken. Im Artikel „Erzwungene Schwingungen" ist in Figur 21 ein Wellenmesser der ersten Art abgebildet. Die Skala des Variometers wird in Frequenzen (oder Schwingungszahlen oder Wellenlängen) geeicht. Ein nach dem in Abschnitt **A II 5 d** α dargelegten Gesichtspunkt mit dem Wellenmesser koppelbarer Meßkreis mit Hitzdrahtmeßinstrument gestattet bei der passiven Benutzung die effektive Stromstärke der im Wellenmesser fließenden Schwingungen abzulesen. Auch kann zur Beobachtung der maximalen Spannungsamplitude ein mit Helium oder Neon gefülltes Geißlerröhrchen dem Kondensator parallel geschaltet werden. Für die aktive Benutzung sind Einrichtungen getroffen, um den Wellenmesser entweder mittels einer Funkenstrecke oder besser nach der in Abschnitt **B I 1** (Fig. 35) beschriebenen Methode mit Hilfe eines Saitenvibrators in Eigenschwingungen zu versetzen.

Die Frequenzeichung der Wellenmesser kann nach mehreren Methoden erfolgen. Z. B.: man mißt den Meßkondensator nach einer der Methoden, die im Artikel „Kapazität" dafür angegeben sind und mißt die Selbstinduktivität der Leitungsbahn nach einer der im Artikel „Induktivität" angegebenen Methoden. Dann liefert die Formel 24 die Frequenz durch Rechnung. Da die Leitungsbahn selbst auch Kapazität besitzt, eicht man besser direkt z. B. in folgender Weise: Aus einem geeichten Kapazitätsvariometer und einer geeigneten Selbstinduktion bildet man einen Kreis, der in sehr loser Koppelung aus einem ungedämpft schwingenden Primärkreise erregt wird. Die Stromstärke J_{eff} des Meßkreises liest man an einem Hitzdrahtstrommesser ab. Die Spannung E_{eff} des Luftkondensators mißt man mit Hilfe eines quadratisch geschalteten Elektrometers. Dann ist bei einer Stellung C'_L des Luftkondensators

$$E'_{eff} = \frac{J'_{eff}}{(C'_L + C_E)\omega}$$

wo C_E die Kapazität des Elektrometers ist. Bei einer zweiten Stellung C''_L des Luftkondensators

$$E''_{eff} = \frac{J''_{eff}}{(C''_L + C_E)\omega}$$

$$\text{woraus } \omega = \frac{\dfrac{J'_{eff}}{E'_{eff}} - \dfrac{J''_{eff}}{E''_{eff}}}{C' - C''} \quad . \quad . \quad 59)$$

Oder man ermittelt die Frequenz mit Hilfe eines Lecherschen Drahtsystems, wie Abschnitt **C II 4** angegeben.

b) Resonanzkurve des Stromeffektes.

α) Frequenzmessung. Bei passiver Benutzung koppelt man den Wellenmesser möglichst lose mit dem Schwingungskreise, dessen Frequenz gemessen werden soll, und variiert ihn, bis das Hitzdrahtinstrument die maximale Stromstärke anzeigt. Die so ermittelte Resonanzstellung des Wellenmessers ergibt dann mit Hilfe der Eichkurve die Frequenz. Für die Messung der Frequenz genügt auch die Ermittelung derjenigen Einstellung des Wellenmessers, bei der die Spannung am Kondensator ein Maximum wird, was sich mit Hilfe der oben erwähnten Geißlerröhre konstatieren läßt. Setzt man die Geißlerröhre radial auf die Achse des Wellenmessers und läßt diesen mit ihr dauernd rotieren, so wird sie immer an derjenigen Stelle der Kreisbahn aufleuchten, die der Resonanzeinstellung entspricht. Sie kann so direkt als Zeiger auf einer untergelegten Skala die Frequenz anzeigen (E. F. Huth).

Bei aktiver Benutzung erregt man im Wellenmesser Schwingungen, deren Frequenz man so lange variiert, bis ein im zu messenden Kreise angebrachter Strom- oder Spannungsindikator das Resonanzmaximum anzeigt; die betreffende Stellung des Wellenmessers ergibt dann wieder die Frequenz. Auf diese Art lassen sich z. B. die Eigenschwingungen von Spulen bestimmen, indem man als Indikator ein an ein Spulenende angehängtes Heliumröhrchen benutzt.

Wenn man Frequenzen messen kann, läßt sich sogleich eine Reihe von weiteren Messungen durchführen. Z. B. Vergleichung von Kapazitäten, indem man sie mit ein und derselben Induktivität zu einem Schwingungskreise verbindet. Die Frequenzgleichungen

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_1}} \quad \text{und} \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{LC_2}}$$

liefern

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 60)$$

Eine Vergleichsmessung von Kapazitäten ermöglicht sogleich auch eine Messung von Dielektrizitätskonstanten, und zwar in Abhängigkeit von der Frequenz.

Analog erledigt sich die Vergleichung von zwei Induktivitäten, die mit ein und derselben Kapazität zu einem Schwingungskreise verbunden werden.

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \quad \ldots\ldots \quad 61)$$

Auch gegenseitige Induktivitäten lassen sich so bestimmen. Man schaltet die betreffenden Koppelungsspulen in der relativen Lage, in der sie benutzt werden sollen, hintereinander und verbindet sie mit einem Kondensator der Kapazität C zu einem Schwingungskreise. Die Messung der Frequenz ω_1 liefert eine Selbstinduktivität L_1. Nun kommutiert man, ohne an der Spulenlage etwas zu ändern, die Endverbindungen der einen Spule und mißt wieder die Frequenz ω_2. Sie liefert eine Selbstinduktivität L_2. Dann ist

$$L_{12} = \frac{L_1 - L_2}{4} \quad \ldots\ldots \quad 62)$$

(vgl. den Artikel „Induktivität").

Aus den Erörterungen des nächsten Absatzes geht hervor, daß sich die Frequenz nach den vorstehend beschriebenen Methoden um so genauer ermitteln läßt, je ausgeprägter die Resonanz ist. Dazu muß die Eigendämpfung des Wellenmessers möglichst klein sein. Die Mittel dazu sind Abschnitt **A II 5 a β** angegeben worden.

β) Dämpfungsmessung. Um mit Hilfe des Wellenmessers das Dämpfungsdekrement einer Schwingung zu finden, ist es nötig, die ganze Resonanzkurve aufzunehmen, d. h. die effektive Stromstärke des möglichst lose mit dem Schwingungskreise gekoppelten Wellenmessers als Funktion des am Wellenmesser variierten Frequenzverhältnisses $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\omega_\Re} = \beta$ ($\omega_\Re$ ist die Einstellungsfrequenz des Wellenmessers bei Resonanz). Die Theorie ergab für diese Resonanzkurve die Gleichung (44). Sie ist in Figur 76 in der Weise graphisch dargestellt, daß als Ordinate das Verhältnis

$$\left(\frac{J_{eff}}{(J_{eff})_\Re}\right)^2 = \frac{(\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2)^2}{4\pi^2\left\{[1-\beta]^2 + \left(\frac{\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2}{2\pi}\right)^2\right\}} \quad 63)$$

aufgetragen ist.

Figur 76 a und b zeigt sie für zwei verschiedene Werte von $\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2$. Man sieht, wie diese Resonanzkurve des Stromeffekts um so spitzer verläuft, je kleiner $\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2$ ist; oder, da $\bar{\mathfrak{d}}_1$ des zu messenden Kreises nicht variabel ist, je kleiner $\bar{\mathfrak{d}}_2$ des Wellenmessers gemacht wird. Aus Gleichung 63 ergibt sich

$$\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2 = \pm 2\pi(1-\beta)\sqrt{\frac{1}{\left\{\frac{(J_{eff})_\Re}{J_{eff}}\right\}^2 - 1}} \quad 64)$$

Wird das zur Messung des Stromes verwendete Hitzdrahtinstrument in Watt geeicht, so messen seine Ausschläge a direkt

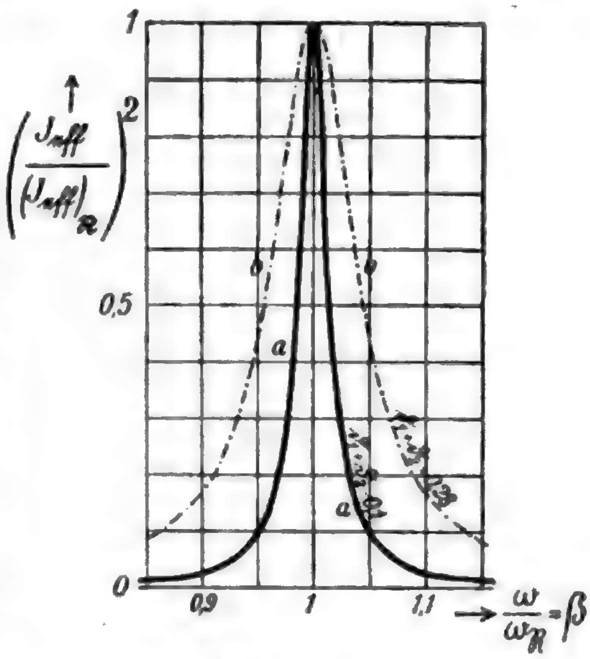


Fig. 76.

die $(J_{eff})^2$ Werte und Gleichung (64) kann geschrieben werden

$$\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2 = \pm 2\pi(1-\beta)\sqrt{\frac{1}{\frac{a_\Re}{a} - 1}} \quad \ldots \quad 64a)$$

Sind β_o und β_u die Frequenzverhältnisse oberhalb und unterhalb der Resonanz, bei denen ein bestimmtes $\frac{a_\Re}{a}$ auftritt, so gelten die beiden Gleichungen

$$\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2 = 2\pi(\beta_o - 1)\sqrt{\frac{1}{\frac{a_\Re}{a} - 1}}$$

$$\text{und } \bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2 = 2\pi(1 - \beta_u)\sqrt{\frac{1}{\frac{a_\Re}{a} - 1}}$$

woraus

$$\bar{\mathfrak{d}}_1 + \bar{\mathfrak{d}}_2 = \pi(\beta_o - \beta_u)\sqrt{\frac{1}{\frac{a_\Re}{a} - 1}}$$

$$= \pi\frac{\omega_o - \omega_u}{\omega_\Re}\sqrt{\frac{1}{\frac{a_\Re}{a} - 1}} \quad \ldots \quad 65)$$

Macht man $\frac{a_\Re}{a} = 2$, d. h. stellt man den Wellenmesser auf diejenigen beiden Frequenzen oberhalb und unterhalb der Resonanz-

frequenz, die gerade den halben Stromeffekt ergeben, wie in der Resonanzeinstellung, so wird

$$\overline{\mathfrak{d}}_1 + \overline{\mathfrak{d}}_2 = \pi \frac{\omega_0 - \omega_n}{\omega_{\mathfrak{R}}} \quad \ldots \quad 65a)$$

Alle diese Beziehungen gelten auch, wenn man die Frequenz im Schwingungskreise ändert und den Stromeffekt im Wellenmesser mißt. Schwingt das Primärsystem ungedämpft, so wird $\mathfrak{d}_1 = 0$ und es ergibt sich sogleich eine Methode, die Eigendämpfung des Wellenmessers zu bestimmen. Eine andere Methode dazu besteht darin, dem Wellenmesser einen Widerstand R′ zuzuschalten. Dadurch erfährt das Dekrement eine Vermehrung um

$$\overline{\mathfrak{d}}_2' = \overline{\delta}' T = \pi R' \sqrt{\frac{C_2}{L_2}}$$

(vgl. Gleichung 27). $(J_{eff}^2)_{\mathfrak{R}}$ wird dadurch auf $(J_{eff}^2)'_{\mathfrak{R}}$, $\alpha_{\mathfrak{R}}$ auf $\alpha_{\mathfrak{R}}'$ herabgedrückt. Mit Hilfe der Gleichung 44 ergibt sich dann

$$\overline{\mathfrak{d}}_2 = \overline{\mathfrak{d}}_2' \frac{1}{\frac{\alpha_{\mathfrak{R}}}{\alpha'_{\mathfrak{R}}} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{\overline{\mathfrak{d}}_2'}{\overline{\mathfrak{d}}_1 + \overline{\mathfrak{d}}_2}} \right\} - 1} \quad 66)$$

oder, wenn $\overline{\mathfrak{d}}_2'$ klein gegen $\overline{\mathfrak{d}}_1 + \overline{\mathfrak{d}}_2$

$$\overline{\mathfrak{d}}_2 = \overline{\mathfrak{d}}_2' \frac{1}{\frac{\alpha_{\mathfrak{R}}}{\alpha'_{\mathfrak{R}}} - 1} \quad \ldots \quad 66a)$$

Falls im Schwingungskreis ungedämpfte Schwingungen verfügbar sind, ergibt sich noch folgende sehr einfache Methode: Man stellt den Wellenmesser auf Resonanz ein, der Stromeffekt sei $(J_{eff}^2)_{\mathfrak{R}}$ (Ausschlag $\alpha_{\mathfrak{R}}$). Nun schaltet man R'_2 zu; Stromeffekt $(J_{eff}^2)'_{\mathfrak{R}}$ (Ausschlag $\alpha'_{\mathfrak{R}}$). Im Wellenmesser wirkt in beiden Fällen die gleiche E M K. Da im Resonanzfall der Wechselwiderstand des Wellenmessers lediglich in seinem Ohmschen Widerstand besteht (vgl. Gleichung 42), so wird demnach der Spannungsabfall

$$(J_{eff}^2)_{\mathfrak{R}} R_2 = (J_{eff}^2)_{\mathfrak{R}}' (R_2 + R_2') \quad . \; . \quad 67)$$

woraus

$$\overline{\mathfrak{d}}_2 = \frac{\overline{\mathfrak{d}}_2'}{\sqrt{\frac{\alpha_{\mathfrak{R}}}{\alpha_{\mathfrak{R}}'}} - 1} \quad \ldots \quad 67a)$$

Da die Beziehungen, auf die sich alle die genannten Messungen mit Hilfe des Wellenmessers stützen, konstante Frequenz, konstante Entladungszahl ζ und exponentielle Dämpfung des gemessenen Kreises verlangen, so dürfen nur solche Erregungsweisen der Schwingungen verwendet werden, die das sicherstellen. Funkenerregung z. B. kann deshalb mit Rücksicht auf das Abschnitt **B I 2** Gesagte fehlerhafte Messungen ergeben. Sehr geeignet ist die Erregung durch Löschfunken.

Die Dekrementmessungen mit Hilfe des Wellenmessers können zur Messung der Gesamtheit aller solcher Energieverluste herangezogen werden, die ein exponentielles Dekrement hervorbringen, z. B. der Energieverluste im Dielektrikum, der Ausstrahlung usw., nicht aber der Funkenverluste und der durch Sprühen der Kondensatoren hervorgebrachten (vgl. Abschnitt **A II 5** α, β). Wenigstens ist in den letzten Fällen Vorsicht bei der Beurteilung der Ergebnisse nötig. Ist $\mathfrak{R}$ das gesamte Widerstandsmoment, welches diesen Verlusten Rechnung trägt, so gilt

$$\mathfrak{d} = \frac{\mathfrak{R} T}{2\mathfrak{L}} = \frac{\mathfrak{R}\lambda}{2\mathfrak{L}c_0} = \pi\mathfrak{R}\sqrt{\frac{\mathfrak{C}}{\mathfrak{L}}} = 2\pi^2 c_0 \frac{\mathfrak{R}\mathfrak{C}}{\lambda} \quad 68)$$

eine Beziehung, mit deren Hilfe sich $\mathfrak{R}$ aus $\mathfrak{d}$ finden läßt.

γ) R e s o n a n z m e s s u n g e n a n g e k o p p e l t e n S y s t e m e n. Figur 77 zeigt die Resonanzkurve, die mit Hilfe des Wellenmessers von einem ziemlich festgekoppelten System aus zwei Kreisen gleicher Eigen-

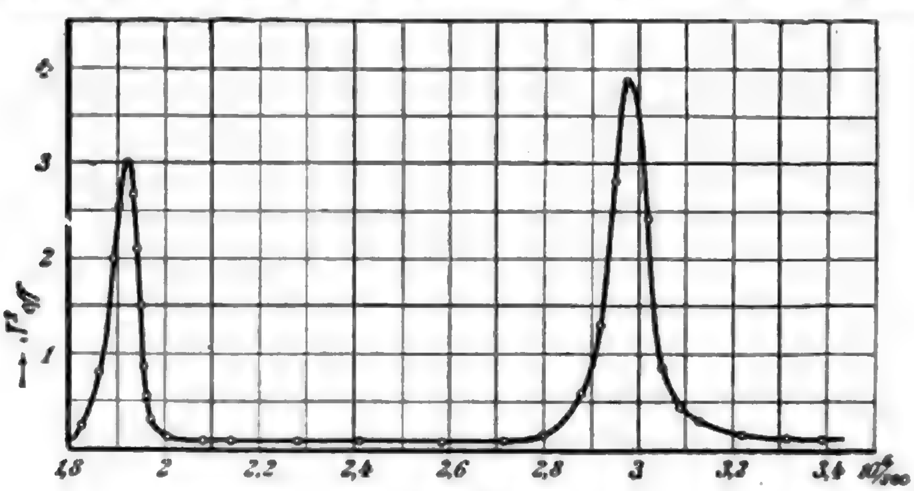


Fig. 77.*

frequenz ω erhalten wird. Den beiden Hauptschwingungen entsprechen die beiden Resonanzmaxima. Auf jedes der beiden Maxima läßt sich das in den beiden vorhergehenden Absätzen Gesagte anwenden und wir erhalten so die Werte ω_a und ω_b, sowie $\mathfrak{d}_a$ und $\mathfrak{d}_b$ der beiden Hauptschwingungen (Gleichung 46 und 47). Daraus läßt sich der Kopplungskoeffizient

$$K' = \frac{1 - \left(\frac{\omega_b}{\omega_a}\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega_b}{\omega_a}\right)^2}$$

finden.

Liegt lose Koppelung der beiden Systeme vor, so greifen die Resonanzmaxima übereinander und es sind besondere Kunstgriffe nötig, um dann die beiden Maxima einwandfrei zu erkennen. Ihre Darlegung würde hier zu weit führen.

Hat man ein gekoppeltes System aus zwei Kreisen gleicher Eigenfrequenz, dessen Primärsystem durch eine Funkenstrecke erregt ist, und nimmt man seine Resonanzkurve auf, so beobachtet man im allgemeinen eine Kurve wie Figur 77 oder b in Figur 78. Macht

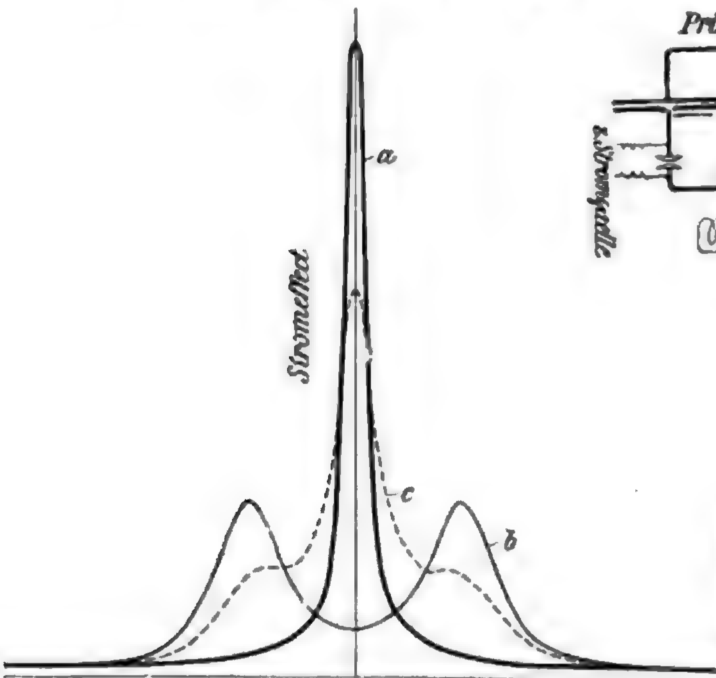


Fig. 78.*

man die Funkenstrecke kürzer und kürzer, so treten Kurven wie c auf und schließlich bleibt nur Kurve a übrig. Dies ist der Beweis, daß Löschwirkung in der Funkenstrecke aufgetreten ist, so daß nur die Eigenschwingung des angestoßenen Sekundärkreises übrig bleibt. Durch solche Messungen hat M. Wien die Tatsache der Stoßerregung durch Löschfunken entdeckt. Die Methode eignet sich zur systematischen Untersuchung der Umstände, welche eine gute Löschwirkung sicherstellen.

c) Resonanzkurve des Dynamometereffektes. Ein Dynamometer ist ein Meßinstrument mit einer feststehenden und einer gekreuzt zu ihr stehenden drehbaren Spule (vgl. den Artikel „Elektrischer Strom"). Schickt man durch die eine der beiden Spulen einen Wechselstrom i_1, durch die andere einen Wechselstrom i_2, so ist das mittlere Drehmoment auf die drehbare Spule dem Dynamometereffekt

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_1 i_2 dt \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 69)$$

proportional. Das Instrument zeigt diesen Dynamometereffekt durch seinen Dauerausschlag an.

Ist i_1 dem Strome eines zu messenden Schwingungskreises, i_2 dem Strome eines von ihm aus erregten Wellenmessers proportional (vgl. Fig. 79), so zeigt die Theorie, daß der Dynamometereffekt bei Variation der Frequenz ω_2 des Wellenmessers (Abszissenaxe) den in Figur 80 angedeuteten Charakter hat; im Resonanzfall wird der

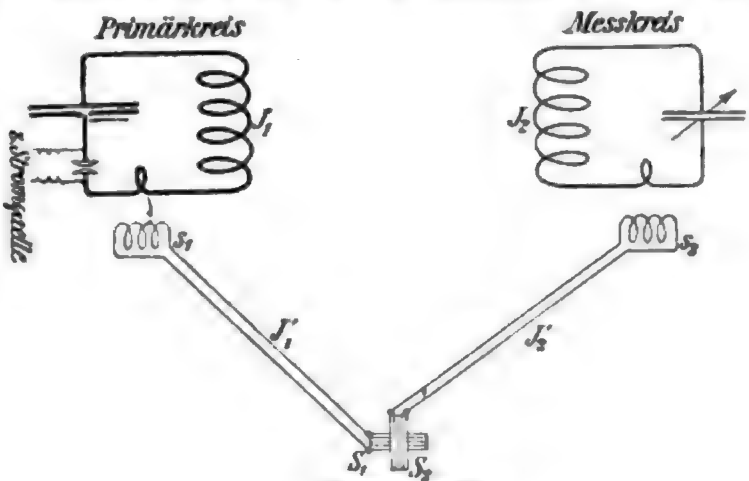


Fig. 79.*

Dynamometereffekt 0. Der übrige Verlauf hängt wie beim Stromeffekt von $\mathfrak{d}_1 + \mathfrak{d}_2$, sowie von der Koppelung des Wellenmessers mit dem Schwingungskreise ab. Figur 81 I und II zeigen z. B. die Aenderung mit dem Betrage von $\mathfrak{d}_1 + \mathfrak{d}_2$. I gilt für den größeren, II für den kleineren Betrag. Bezeichnen ω_a und ω_b diejenigen Frequenzen, für die der Dynamometereffekt das positive und negative Maximum besitzt, so ist bei sehr loser Koppelung des Wellenmessers

$$\mathfrak{d}_1 + \mathfrak{d}_2 = \pi\left\{2 - \frac{\omega_a + \omega_b}{\omega_{\mathfrak{R}}}\right\} \quad . \; . \; . \quad 70)$$

So lassen sich auch nach dieser Methode sowohl Frequenzmessungen wie Dekrement-

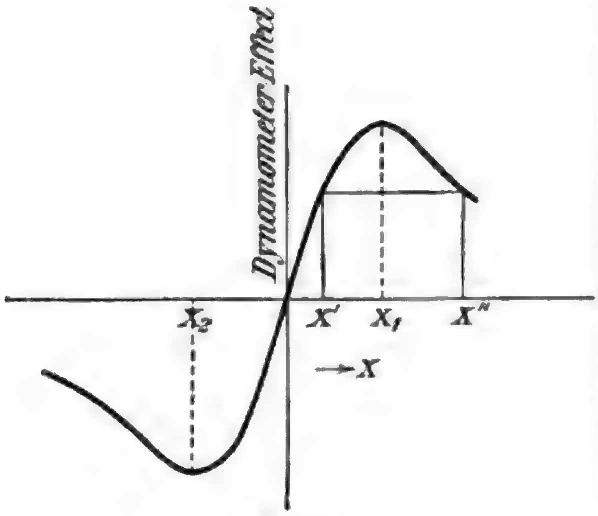


Fig. 80.*

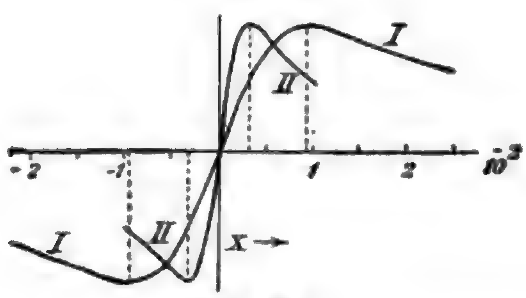


Fig. 81.*

messungen machen. Die Frequenzmessung läßt sich hier mit erheblich größerer Schärfe machen, da eine Nulleinstellung in Frage kommt. Auch spielt die Art und Regelmäßigkeit der Erregung des Kreises hier keine Rolle. Die Erfinder der Methode (Mandelstam und Papalexi) haben ein besonderes Dynamometer für diese Zwecke angegeben.

D. Die Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen aus schwingenden elektrischen Systemen.

I. Wesen der Ausstrahlung. Strahlungswiderstand.

Es ist mehrfach darauf hingewiesen worden, daß es völlig abgeschlossene Systeme praktisch nicht gibt, sondern daß alle Systeme, die wir isoliert betrachten, in Wirklichkeit mehr oder weniger fest mit der übrigen Welt gekoppelt sind, und in entsprechendem Energieaustausch mit ihr stehen. Aus diesem Grunde zeigen sich ihre Eigenschwingungen stets gedämpft, entsprechend der Energie, die sie in jeder Schwingungsperiode an die Außenwelt verlieren.

Daß die elektrischen Systeme immer mit der Außenwelt gekoppelt sind, folgt aus der Natur des elektrischen Energieträgers, der nach jetziger Auffassung nichts ist als Ziel- und Haftpunkt eines elektrischen Aetherzwanges, der sich von ihm aus in den Aetherraum erstreckt (vgl. den Artikel „Elektron"). Daher ist jedes elektrische Schwingungssystem naturgemäß mit dem Aetherraum gekoppelt. Infolge dieser Koppelung reagiert der Aetherraum auf eine elektrische Schwingung durch Entwickelung von EMKK, die einen Energieaustausch zwischen dem Schwingungssystem und dem Aether zur Folge haben. So ist der Formänderungswiderstand $\mathfrak{W}_F$ durch dessen Ueberwindung nach **A II 1** Aufspeicherung von elektrischer Anordnungsenergie in dem System erfolgt, nichts anderes als die Reaktion des Aethers gegen die Ausbildung des äußeren elektrischen Feldes, welches durch die als „Ladung" bezeichnete Gleichgewichtsstörung des Systems erzeugt wird. Mit anderen Worten: $\mathfrak{W}_F$ ist die EMK, durch deren Vermittelung das System mit dem Aetherraum elektrostatische Energie austauscht. Ebenso ist der elektrische Trägheitswiderstand $\mathfrak{W}_T$ im Abschnitt **A II 2** nichts anderes als die Reaktion des Aethers gegen die Ausbildung des magnetischen Feldes, wie es mit der Erregung eines elektrischen Stromes in dem System verknüpft ist. $\mathfrak{W}_T$ ist also die EMK, durch deren Vermittelung das System magnetische Energie mit dem Aetherraume austauscht.

Es liegt im Wesen dieser beiden EMKK, immer dann als Gegen-EMK in dem System aufzutreten, wenn die andere als treibende EMK wirksam ist. Mit anderen Worten: es liegt im Wesen der betreffenden Energieprozesse, daß das Verschwinden von elektrostatischer Feldenergie das Entstehen des gleichen Betrages von magnetischer zur Folge hat und umgekehrt. Darum beruht auf diesen beiden EMKK die Möglichkeit der elektrischen Schwingungen, wie sie im Abschnitt **A II 3** ausgeführt ist. Bei diesem Tatbestande muß im Grunde die ganze von dem schwingenden elektromagnetischen Felde berührte Aethersphäre dem elektrischen Systeme als Bestandteil zugerechnet werden.

EMKK der vorgenannten Art werden in dem Artikel „Elektromotorische Kraft" als „reversible" EMKK bezeichnet und es ist dort auch ausgeführt, daß und warum sie einer elektrischen Schwingung nicht dauernd Energie entziehen können. Dort ist weiter gezeigt, daß es aber auch „irreversible" EMKK gibt, die eine solche Koppelung des elektrischen Systems mit der Außenwelt zum Ausdruck bringen, daß eine dauernde Energieabgabe an sie die Folge ist.

Eine dieser EMKK haben wir hier bereits in der durch $\mathfrak{W}_R = i\mathfrak{R}$ bestimmten EMK kennen gelernt, die sich der Elektrizitätsbewegung in Leitern entgegenstellt und das Joulesche Dekrement $\mathfrak{d}_J$ der Schwingungen verursacht. Sie bedingt an einer

ungedämpften Schwingung $i = J\sin\omega t$ pro Sekunde den Energieverlust

$$L_R = \frac{1}{T}\int_0^T i^2\Re dt = \Re J_{eff}^2 \quad . \quad . \quad 71)$$

Eine weitere Gegen-EMK dieser Art entwickelt der mit der Schwingung gekoppelte Aether als Reaktion gegen die Ausbildung jenes Aetherzustandes, der zu einer dauernden Wegwanderung von Energie in Form elektromagnetischer Strahlung führt. Sie ist für die Grundschwingung eines Oszillators von der Länge l, wenn

$$\bar{i} = \frac{1}{l}\int_0^l i dx = \frac{1}{l}\int_0^l i_b f(x)dx = \alpha i_b \quad 72)$$

den räumlichen Mittelwert des Stromes auf ihm bedeutet, in jedem Moment durch

$$\mathfrak{W}_S = \mathfrak{S}\frac{d^2\bar{i}}{dt^2} = \alpha\mathfrak{S}\frac{d^2 i_b}{dt^2} \quad . \quad . \quad 73)$$

gemessen. Die mittlere Strahlungsleistung während einer Periode

$$L_S = \frac{1}{T}\int_0^T i\mathfrak{S}\frac{d^2\bar{i}}{dt^2}dt$$

wird bei ungedämpftem Verlauf der Schwingung

$$L_S = \frac{\alpha^2\mathfrak{S}\omega^2 J_b^2}{T}\int_0^T \sin^2\omega t dt$$

$$= \frac{\alpha^2\mathfrak{S}\omega^2 J_b^2}{2} = \alpha^2\mathfrak{S}\omega^2(J_b)^2_{eff} = \Re_S(J_b)^2_{eff}. \quad 74)$$

Bei gedämpftem Verlauf

$$(i = \alpha J\varepsilon^{-\frac{\mathfrak{d}}{T}t}\sin\omega t)$$

$$L_S = \frac{\alpha^2\mathfrak{S}\omega^2 J_b^2}{T}\int_0^T \varepsilon^{-\frac{2\mathfrak{d}}{T}t}\sin^2\omega t dt$$

$$= \zeta\frac{\pi}{\omega\mathfrak{d}}\Re_S(J_b)^2_{eff} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 74a)$$

ζ Zahl der gedämpften Entladungen (vgl. Gleichung 52a).

In Analogie zu der Beziehung 71 nennt man $\Re_S = \alpha^2\mathfrak{S}\omega^2$ den Strahlungswiderstand des betrachteten Oszillators. Sein von der geometrischen Form desselben abhängiger Wert bestimmt unter sonst gleichen Bedingungen die Stärke seiner Ausstrahlung.

Für die Größe $\mathfrak{S}$ ergibt sich ein Wert aus der Berechnung, die Hertz für die Ausstrahlung eines sogenannten Dipols (vgl. **A II 5 c**) durchgeführt hat. Das Ergebnis der Hertzschen Berechnung läßt sich nämlich nach Rüdenberg in der Form

$$L_S = \frac{1}{3}\frac{l^2}{c_0}\omega^2 J^2 = \frac{2}{3}\frac{l^2}{c_0}\omega^2 J^2_{eff} \quad . \quad 74b)$$

schreiben, wobei J die längs des Dipols gleiche quasistationäre Stromamplitude, c_0 die Lichtgeschwindigkeit ist (alles in absoluten elektromagnetischen cgs Einheiten gemessen). Wegen der quasistationären Stromverteilung ist beim Dipol $\alpha = 1$. Daher ergibt ein Vergleich von Gleichung (74) mit Gleichung (74a), daß zu setzen ist

$$\mathfrak{S} = \frac{2}{3}\frac{l^2}{c_0}$$

So erhalten wir für die Grundschwingung eines beliebigen Oszillators aus Gleichung (74)

$$L_S = \frac{1}{3}\omega^2\frac{(\alpha l J_b)^2}{c_0} = \frac{2}{3}\omega^2(l_\alpha)^2(J_b)^2_{eff}$$
$$= \Re_S(J_b)^2_{eff} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 75)$$

also

$$\Re_S = \frac{2}{3}\omega^2\frac{l_\alpha^2}{c_0} = \frac{8}{3}\pi^2 c_0\left(\frac{l_\alpha}{\lambda}\right)^2, \quad . \quad . \quad 76)$$

wenn man $\omega = \frac{2\pi c_0}{\lambda}$ berücksichtigt (vgl. Gleichung 49).

Ein Vergleich von Gleichung (76) mit Gleichung (74b) lehrt daß $l_\alpha = \alpha l$ die Länge eines Dipols ist, der bei gleicher Stromamplitude ebensoviel Energie ausstrahlt wie der betrachtete Oszillator. Man nennt l_α die „äquivalente Dipollänge" des Oszillators.

Sie läßt sich in jedem Falle aus der gemessenen Stromverteilungskurve konstruieren. Denn

$$\alpha l J_b = J_b\int_0^l f(x)dx$$

ist (vgl. Gleichung 72) nichts anderes, als die Fläche eines Rechtecks, das den gleichen Flächeninhalt hat, wie die von der Stromverteilungskurve begrenzte Fläche (vgl. das Beispiel Fig. 82). Wird ein gleichgroßes Rechteck konstruiert, welches als die eine

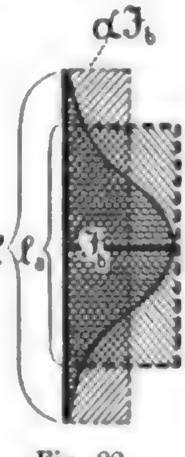


Fig. 82.

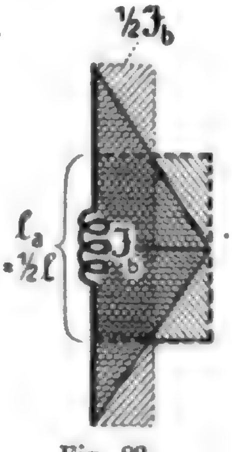


Fig. 83.

Rechteckseite den Wert J_b im Strombauche hat, so ist l_α seine andere Seite. Für sinusförmige Stromverteilung

$$i = i_b \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \text{ wird } \alpha = \frac{2}{\pi}.$$

Für eine vom Strombauch aus nach den Oszillatorenden geradlinig abfallende Verteilung (vgl. Fig. 83) wird $\alpha = \frac{1}{2}$.

Für die Grundschwingung eines linearen Oszillators mit sinusförmiger Stromverteilung ergibt sich somit, da

$$l_\alpha = \frac{2}{\pi} l \text{ und } \lambda = 2l \text{ ist,}$$

$$\mathfrak{R}_S = \frac{8}{3} c_0 \text{ cgs} = \frac{8 c_0}{3.10^9} \text{Ohm} = 80 \text{Ohm} \quad . \quad 77)$$

II. Mechanismus der Ausstrahlung.

Man könnte versucht sein, aus der Analogie des Strahlungswiderstandes zum Ohmschen Widerstande den Schluß zu ziehen, daß er sich aus den Anteilen der einzelnen Stromelemente in derselben Weise additiv zusammensetzen ließe, wie der Ohmsche Widerstand. Mit anderen Worten, daß sich die Ausstrahlung eines Oszillators einfach additiv aus den Ausstrahlungen zusammensetze, die von den einzelnen herausgegriffenen Teilchen ausgesandt würden. Dem ist aber nicht so, vielmehr ist die Ausstrahlung aus jedem Leiterelement wesentlich mitbestimmt durch die Stromvorgänge in den übrigen Teilen des Systems. Der Strahlungswiderstand $\mathfrak{R}_S$ ist daher bei jedem System nur als Ganzes zu erfassen; von dem Strahlungswiderstande eines Leiterelementes zu sprechen, wie man von dessen Ohmschem Widerstand spricht, geht nicht an. Die Gründe hierfür erkennt man, wenn man auf den Aethermechanismus der Ausstrahlung zurückgeht. Derselbe ist z. B. im Artikel „Elektromotorische Kraft" auseinandergesetzt. Dort ist gezeigt, daß in einem elektromagnetischen Felde naturnotwendig eine Energiewanderung stattfinden muß, wenn senkrecht zueinander magnetischer Zwang $\mathfrak{H}$ und elektrischer Zwang $\mathfrak{E}$ zusammentreffen. Die Energiewanderung erfolgt senkrecht zu der Ebene, die durch die Richtungen von $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ gebildet wird; die Energiemenge, die pro Sekunde durch einen Quadratzentimeter dieser Ebene wandert, ist

$$L_S = \frac{1}{4\pi} \mathfrak{E}\mathfrak{H} \text{ cgs} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 78)$$

der Sinn des Energiestromes ist durch Figur 84 in Beziehung zu dem Sinn von $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ dargestellt.

Betrachten wir nun das elektromagnetische Feld z. B. eines schwingenden linearen Oszillators: jeder Feldpunkt muß von jedem an

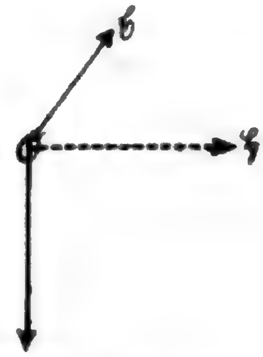


Fig. 84.

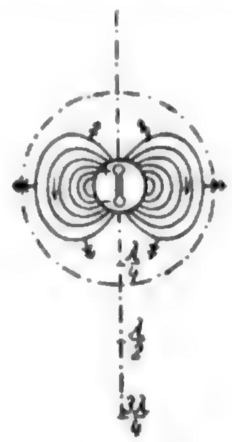
der Schwingung beteiligten Elektron aus sowohl eine elektrische, wie eine magnetische Feldstärke erfahren, die beide sinusförmig wechseln. Die elektrische Feldstärke, die irgendeine in dem Oszillator schwingende Elektrizitätsmenge in einem Feldpunkte erzeugt, wechselt außer ihrer Stärke auch ihre Richtung, während die magnetische Feldstärke nur ihre Stärke ändert, in ihrer Richtung aber stets durch konzentrisch zum Oszillator liegende Kreise festgelegt ist. Die Phasen, mit der diese wechselnden Feldstärken an jedem Punkte zusammentreffen, ergeben sich aus der Tatsache, daß die Uebertragung einer von jedem schwingenden Elektron des Systems ausgehenden Wirkung auf einen Feldpunkt mit Lichtgeschwindigkeit c_0 erfolgt, so daß stets die Zeit $\frac{r}{c_0}$ vergeht, ehe sie in einem um r entfernten Feldpunkte zur Geltung kommt. Nach alledem geht es in dem einen schwingenden Oszillator umgebenden Aether recht kompliziert zu. Die Maxwellsche Theorie gestattet indessen, wie Hertz zuerst zeigte, in einfachen Fällen die Vorgänge rechnerisch zu verfolgen. Die Figur 85a bis i zeigt, gewissermaßen kinematographisch, was Hertz für einen schwingenden Dipol, also einen Oszillator der Form Figur 15a′ ermittelt hat. Figur 85a zeigt den Oszillator zur Zeit t = 0 im Gleichgewichtszustande, von dem ausgehend die Schwingung betrachtet wird. Nach der Zeit von $^1/_8$ Periode hat sich der durch Figur 85b dargestellte Feldzustand herausgebildet, es ist der durch die elektrischen Kraftlinien bezeichnete elektrische Zwangszustand gewissermaßen aus dem Oszillator herausgequollen. Außer diesem elektrischen Zwange besteht wegen des schwingenden Stromes ein magnetischer, der in seiner Verteilung durch ein

System konzentrisch um die Oszillatorachse gelegter Kreise anschaulich gemacht werden kann. Abermals $^1/_8$ Periode später ist der Figur 85c dargestellte Zustand erreicht; nun ist das Maximum der Ladungen an den Dipolenden aufgespeichert, der Strom ist Null geworden, die ganze Energie ist in der Form von Anordnungsenergie aufgespeichert. Bis dahin trafen der elektrische und magnetische Zwang überall in solcher Phase zusammen, daß die Energie entsprechend dem Poyntingschen Satze senkrecht zu den durch die elektrischen Kraftlinien angedeuteten Rotationsflächen in das Feld hinausgetrieben wurde. Die Doppelpfeile der Figuren 85 deuten den Sinn dieser Poyntingschen Energiewanderung an, durch ihre Länge auch ihre ungefähre Intensität. Darin tritt von jetzt ab eine bedeutsame Aende-



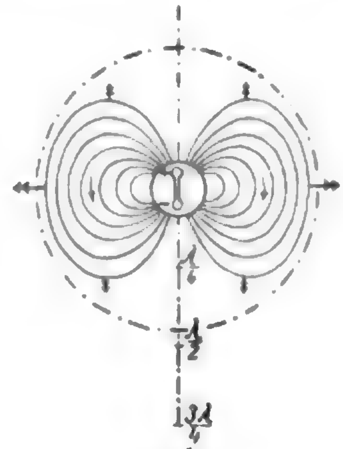
$t = 0.$

Fig. 85a.



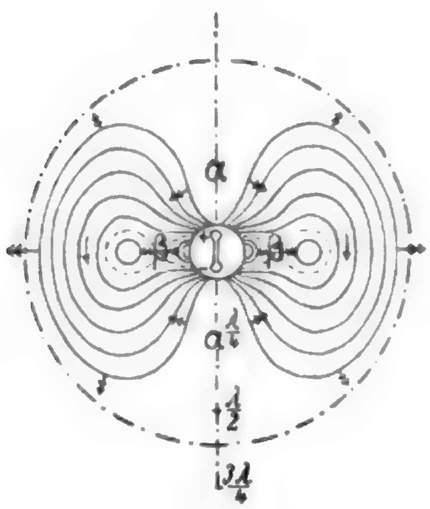
$t = \frac{1}{8} T.$

Fig. 85b.



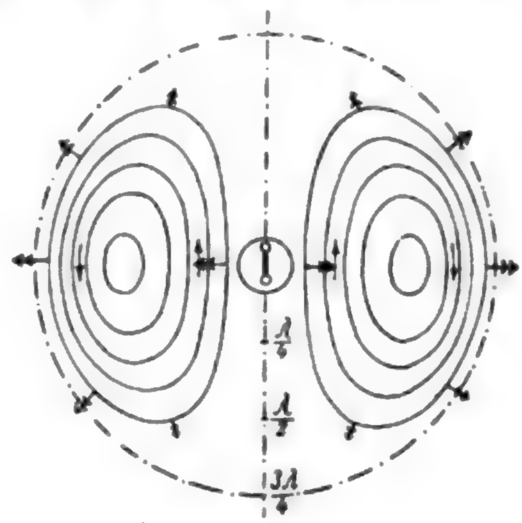
$t = \frac{1}{4} T.$

Fig. 85c.



$t = \frac{3}{8} T.$

Fig. 85d.



$t = \frac{1}{2} T.$

Fig. 85e.

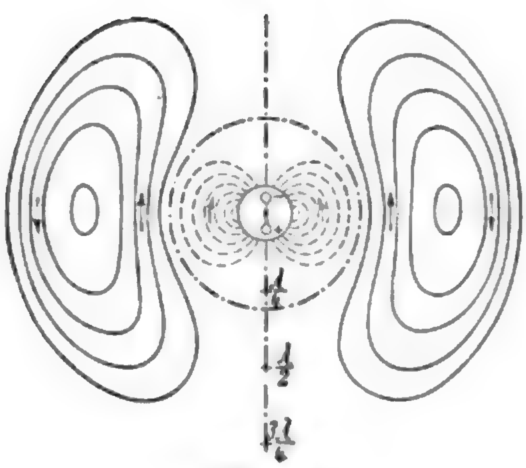


Fig. 85f.

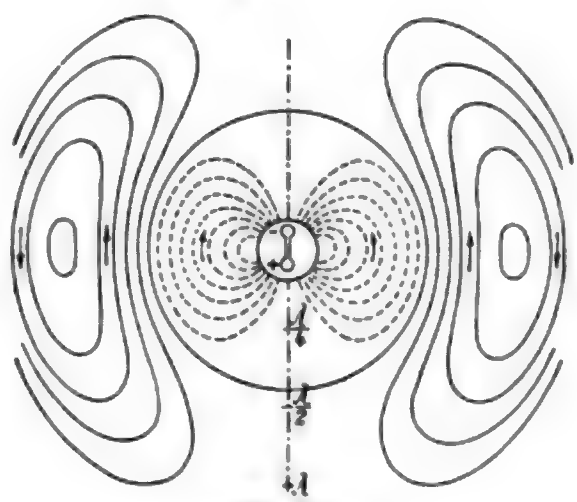


Fig. 85g.

rung ein. Die Ladung beginnt abzunehmen, behält aber ihren bisherigen Sinn noch bei, der Strom aber beginnt in umgekehrter Richtung zu fließen, d. h. es quellen Kreise magnetischer Kraft entgegengesetzten Sinnes in das Feld hinaus. Sie treffen dort so mit den elektrischen Kraftlinien zusammen, daß in dem Gebiet α die Energiewanderung ihren Sinn umkehrt, wie das $^1/_8$ T später Figur 85d schon deutlich zeigt. Das drückt sich in der Tatsache aus, daß sich die elektrische Feldenergie in zwei Teile teilt, einen Teil, der gemäß der reversiblen EMK des Oszillators an Ort und Stelle in magnetische Feldenergie übergeht, einen zweiten, der sich gemäß der irreversiblen EMK von ihm ab-

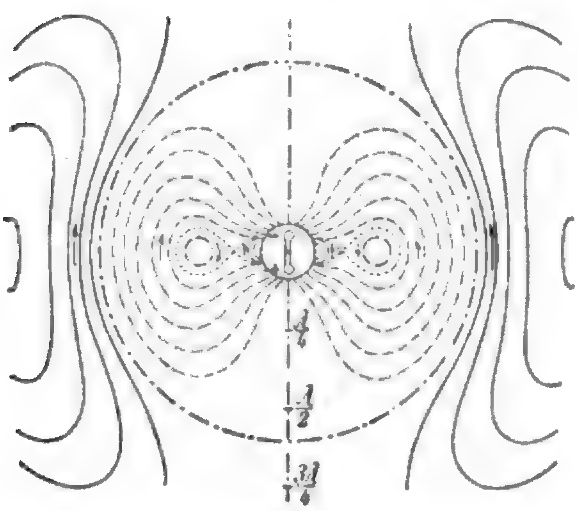


Fig. 85h.

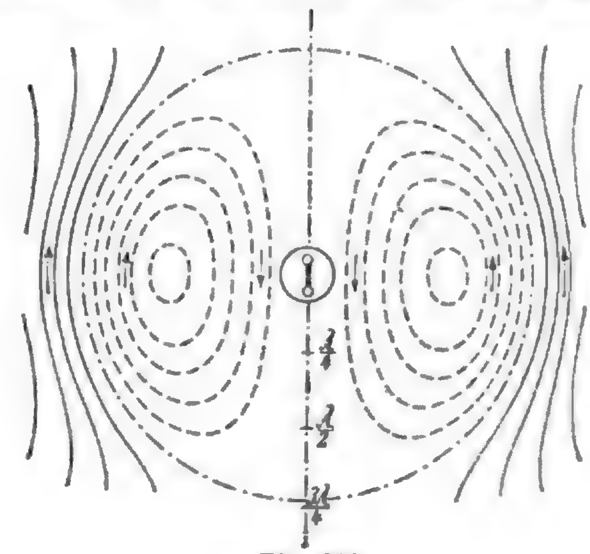


Fig. 85i.

löst und als elektromagnetische Kugelwelle mit Lichtgeschwindigkeit in den Aether hinauswandert. Man sieht, wie sich dementsprechend in Figur 85d die elektrischen Kraftlinien bei β abzuschnüren anfangen, ein Prozeß, der wieder $^1/_8$ Periode später (Fig. 85e) beendet ist. Der nicht abgeschnürte Teil hat sich in den Oszillator zurückgezogen, aus dem gleichzeitig die entsprechenden magnetischen Kraftlinien hervorgequollen sind; der abgeschnürte Teil bildet die wegwandernde Welle. Nun wiederholt sich von Figur 85f ab alles genau so im umgekehrten Sinne und mit Figur 85i ist eine ganze Periode des Vorgangs vollendet.

Man sieht in größerer Entfernung vom Oszillator schreitet die Energie senkrecht zu einer Kugeloberfläche fort, woraus folgt, daß die Strahlungsintensität, d. h. die durch die Flächeneinheit einer Kugeloberfläche wandernde Energie längs eines Radius r mit dem Quadrate der Entfernung abnehmen muß.

Bei anderen offenen Oszillatoren müssen sich für die Grundschwingung die Vorgänge ganz ähnlich abspielen.

Von der Verteilung der fortschreitenden Energie über die Oberfläche der Kugelwelle ist folgendes zu sagen: An den Polen ist sie am kleinsten, an dem Aequator am größten. Solange man sich dem Oszillator noch relativ nahe befindet, wird die Verteilung von der besonderen Form des Oszillators bestimmt sein. Auf größere Entfernung bezogen aber ist schließlich jeder offene Oszillator, der mit seiner Grundschwingung schwingt, ein Dipol, und die Strahlungsverteilung über eine Kugeloberfläche wird schließlich bei wachsendem Kugelradius für alle offenen Oszillatoren nahezu die gleiche.

Das Strahlungsfeld eines linearen Senders, der mit seiner ersten Oberschwingung

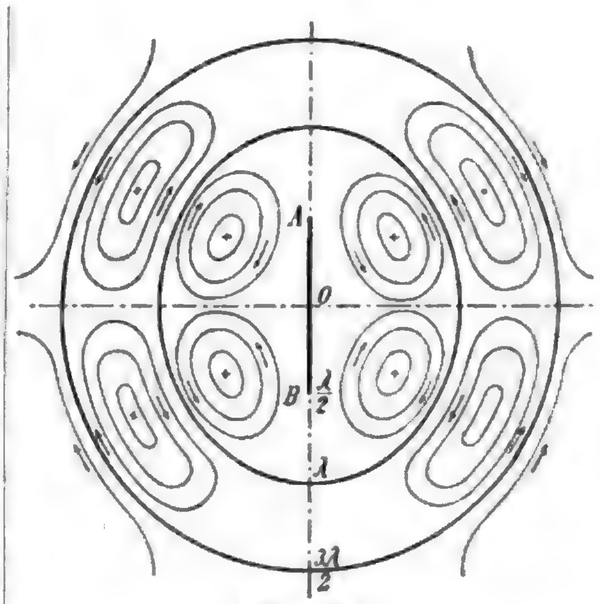


Fig. 86.*

schwingt, zeigt Figur 86, mit der zweiten Figur 87. Man sieht, daß jedes Halbwellenstück prinzipiell strahlen möchte, wie ein Oszillator der betreffenden Länge in seiner Grundschwingung, daß sich die weg-

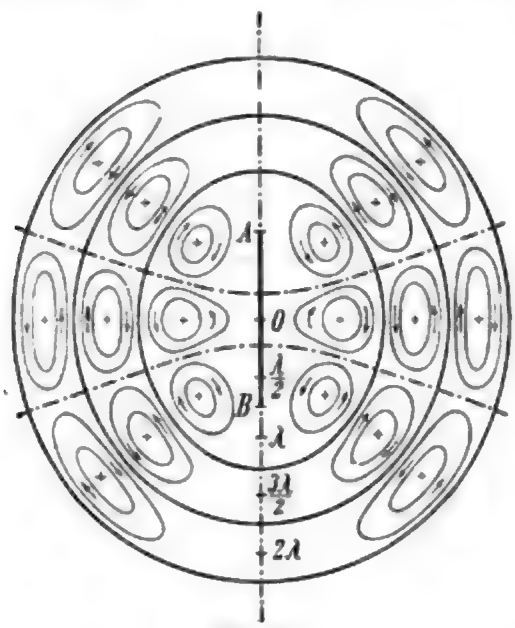


Fig. 87.*

wandernden Strahlungsgebilde der verschiedenen Halbwellenstücke aber gegenseitig den Raum streitig machen, so daß die Strahlung jedes Halbwellenstückes nur in dem Raum vor sich geht, der durch die strichpunktiert angedeuteten Knotenflächen begrenzt wird.

III. Berechnung der Ausstrahlung.

Die Berechnung dieser Strahlungsfelder läßt sich nach Abraham relativ elementar folgendermaßen durchführen: Jedes Oszillatorstückchen AB (Fig. 88) von so geringer

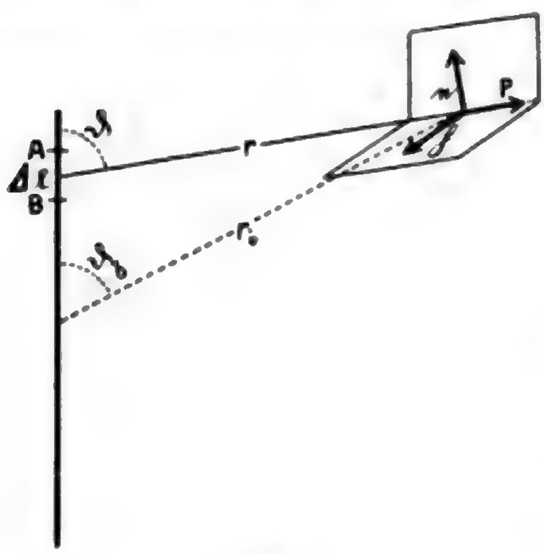


Fig. 88.

Länge Δl, daß die Stromstärke auf ihm als quasistationär betrachtet werden kann, trägt in einem Aufpunkte P zur Bildung eines elektrischen Feldes $\mathfrak{E}$ und eines magnetischen Feldes $\mathfrak{H}$ bei. Die Anteile $\mathfrak{e}$ und $\mathfrak{h}$, die jedes Oszillatorstück AB in einer gegen die Oszillatorlänge großen Entfernung r dazu beibringt, sind nach folgenden Regeln anzusetzen: $\mathfrak{e}$ hat den Betrag

$$\mathfrak{e} = \frac{i\omega\Delta l \sin\vartheta}{r} \text{ cgs} \quad . \; . \; . \; 79)$$

seine Richtung liegt in der durch AB und P gelegten Ebene und steht in ihr überall senkrecht auf r. $\mathfrak{h}$ steht überall senkrecht zu $\mathfrak{e}$, ist also in konzentrisch zu AB gezogenen Kreisen angeordnet und hat den Betrag

$$\mathfrak{h} = \frac{i\omega\Delta l \sin\vartheta}{c_0 r} \text{ cgs} \quad . \; . \; . \; 79a)$$

In jedem Aufpunkte im Abstande r wechseln beide gleichphasig und zwar, da $i = J\sin\omega t$ ist, nach dem Gesetze

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{e} &= \frac{J\omega\Delta l \sin\vartheta}{r}\sin\omega\left(t+\frac{r}{c_0}\right) \\ &= \frac{J\omega\Delta l \sin\vartheta}{r}\sin\left(\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}r\right) \\ \mathfrak{h} &= \frac{J\omega\Delta l \sin\vartheta}{c_0 r}\sin\omega\left(t+\frac{r}{c_0}\right) \\ &= \frac{J\omega\Delta l \sin\vartheta}{c_0 r}\sin\left(\omega t+\frac{2\pi}{\lambda}r\right) \end{aligned}\right\} \; . \; 80)$$

Mit λ wird hier die Strecke bezeichnet, um die sich die Wirkung während einer Schwingungsperiode fortpflanzt, die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung. Für sie gilt $n\lambda = c_0$, daher

$$\frac{\omega r}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} r \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 81)$$

λ ist identisch mit der Wellenlänge, mit der sich eine Schwingung derselben Frequenz längs eines Drahtes im Aether fortbewegt, und die sich demgemäß bei den stehenden Wellen der linearen Oszillatoren offenbart (vgl. z. B. **A I 5 d** β). Daher steht bei diesen die Wellenlänge ihrer Strahlung stets in der Beziehung

$$\lambda_p = \frac{2l}{p} \quad (p = 1, 2, 3 \; . \; . \; . \; . \; .)$$

Den Feldstärken $\mathfrak{e}$ und $\mathfrak{h}$ entspricht nach dem Poyntingschen Satze eine Strahlung, die in der Zeit dt durch ein cm^2 einer Kugeloberfläche vom Radius r eine Energie

$$\frac{1}{4\pi}\,\mathfrak{e}\,\mathfrak{h}\,dt$$

hinausführt.

Beachtet man nun, daß $J = J_b f(x)$ ist, führt statt r überall r_b aus

$$r = r_b - \left(x - \frac{l}{2}\right)\cos\vartheta_b$$

ein (vgl. Fig. 88), und vernachlässigt den Unterschied zwischen den Winkeln ϑ und ϑ_b, was bei großem r immer möglich ist, so ergibt die Integration von $\frac{1}{4\pi}\,\mathfrak{e}\,\mathfrak{h}\,dt$ über

die ganze Kugelfläche die in der Zeit dt erfolgende Gesamtstrahlung. Integration des erhaltenen Ausdrucks über eine ganze Periode liefert die Gesamtstrahlung pro Periode.

Die Rechnungen werden schon in einfachen Fällen ziemlich kompliziert. Abraham hat sie für die Schwingungen eines linearen Oszillators durchgeführt und für ihn den Strahlungswiderstand

$$(\mathfrak{R}_S)_p = c_0 \{2,415 + \lg\text{nat}\, p\} \text{ cgs} \quad p = 1, 2, 3 \ldots \quad . \quad . \quad 81)$$

gefunden.

Das gibt für die Grundschwingung (p = 1)

$$(\mathfrak{R}_S)_1 = 2,44\, c_0 = 73{,}2 \text{ Ohm} \quad . \quad . \quad 81a)$$

Unser allgemeiner Ansatz Gleichung (76) liefert bei Einführung der Hertz-Rüdenbergschen Dipolbeziehung

$$(\mathfrak{R}_S)_1 = \frac{2}{3}\pi^2 c_0 \left(\frac{l_\alpha}{l}\right)^2 = \frac{2}{3}\pi^2 c_0 \alpha^2 \text{ cgs} = 80 \text{ Ohm}$$

(vgl. Gleichung 77). Man sieht, daß in der allgemeinen Gleichung (76) α statt des Wertes $\frac{2}{\pi}$ den Wert $\frac{1{,}8}{\pi}$ erhalten müßte, um den richtigen Strahlungswiderstand zu ergeben. Das hängt mit den in der Rüdenbergschen Beziehung Gleichung (74a) gemachten Vernachlässigungen zusammen.

Für das Gebiet maximaler Strahlung in der Nähe der Aequatorialebene, wo $\sin\vartheta = 1$ gesetzt werden kann, ergeben die Gleichungen (80):

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{e} &= \frac{J\omega\Delta l}{r}\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}r\right) \\ \mathfrak{h} &= \frac{J\omega\Delta l}{c_0 r}\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}r\right) \end{aligned}\right\} \quad . \quad 80a)$$

d. h.: die von den einzelnen Oszillatorelementen ausgehenden Teilfeldstärken $\mathfrak{h}$ und $\mathfrak{e}$ sind in jedem Aufpunkt von gleicher Richtung und in gleicher Phase, so daß sich die Gesamtfeldstärken $\bar{\mathfrak{e}}$ und $\mathfrak{h}$ einfach additiv aus den $\mathfrak{h}$ und $\mathfrak{e}$ Werten zusammensetzen. Daher ergeben sich dort die Gesamtfeldstärken

$$\left.\begin{aligned} \bar{\mathfrak{e}} = \Sigma\mathfrak{e} &= \frac{\omega}{r}\Sigma J\Delta l \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}r\right) \\ &= \overline{\mathfrak{E}}\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}r\right) \\ \bar{\mathfrak{h}} = \Sigma\mathfrak{h} &= \frac{\omega}{c_0 r}\Sigma J\Delta l \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}r\right) = \frac{\bar{\mathfrak{e}}}{c_0} \end{aligned}\right\} 80b$$

Da $\Sigma J\Delta l = \int_0^l J dx = \alpha l J_b$ (vgl. Gleichung 72), so wird

$$\left.\begin{aligned} \overline{\mathfrak{E}} &= \frac{\alpha l J_b \omega}{r} = \frac{l_\alpha J_b \omega}{r} \\ \overline{\mathfrak{H}} &= \frac{l_\alpha J_b \omega}{c_0 r} = \frac{\overline{\mathfrak{E}}}{c_0} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 81)$$

und die Poyntingsche Strahlung

$$\frac{1}{4\pi}\overline{\mathfrak{E}}\,\overline{\mathfrak{H}} = \frac{1}{4\pi c_0}\overline{\mathfrak{E}}^2 = \frac{(l_\alpha\omega)^2}{4\pi}\frac{J_b^2}{r c_0} = \frac{3}{8\pi}\mathfrak{R}_S\frac{J_b^2}{r^2}$$

(vgl. Gleichung 76) [81a)

Danach ist z. B. $\bar{\mathfrak{h}}$ zu irgendeiner Zeit t so verteilt, wie es die Figur 89 zeigt. Die Verteilung des elektrischen und magnetischen Zwanges längs eines „Strahles" zeigt, gewissermaßen in Momentphotographie, die Figur 90.

Gleichungen (81) lassen wieder erkennen, daß die Strahlungswirkung, die ein linearer

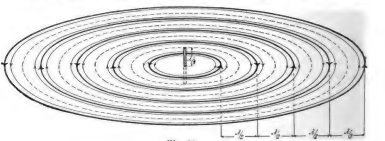


Fig. 89.

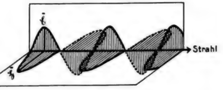


Fig. 90.

Oszillator in der Ferne ausübt, nur von dem Flächeninhalt $l_\alpha \mathfrak{J}_b$ der Stromverteilungskurve abhängt, bei gleichem Strome J_b also von der äquivalenten Dipollänge l_α. Die Beziehungen in den Gleichungen (81) lehren, daß man die früher für lineare Oszillatoren gegebene graphische Methode

zur Ermittelung von l_a aus der Stromverteilungskurve auch auf komplizierte Oszillatoren ausdehnen kann, z. B. auf Formen wie Figur 91.

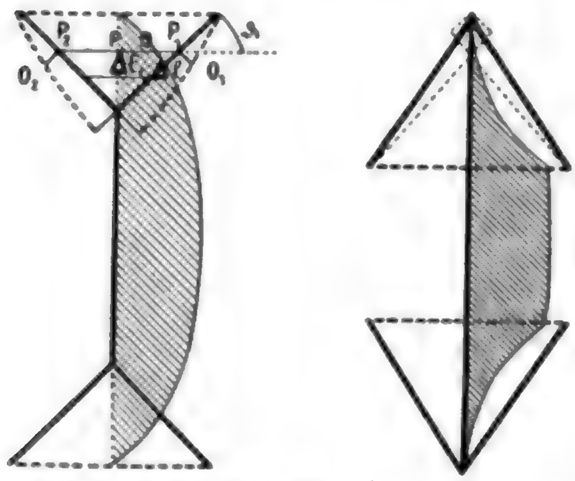


Fig. 91.

Die geneigten Teile sind dann mit ihrer Projektion auf die Oszillatorachse in Rechnung zu setzen, z. B. Δl als $\Delta l_1 = \Delta l \sin \vartheta$. Sie werden also richtig berücksichtigt, wenn man z. B. von P aus senkrecht die Summe $P_1O_1 + P_2O_2$ aufträgt.

Auf einen geschlossenen Schwingungskreis angewendet zeigen Gleichungen (80), daß er so gut wie keine Ausstrahlung haben kann. Denn seine gegenüberliegenden Elemente heben sich in bezug auf die Strahlungswirkung in die Ferne gegenseitig auf. Der Strahlungswiderstand solcher geschlossener Schwingungskreise ist daher Null zu setzen. Aehnlich ist das bei den Lecherschen Drahtsystemen.

Die geschlossenen Schwingungskreise können bei einer vorgegebenen Erregerspannung E, z. B. bei Erregung mit einer Funkenstrecke bestimmter Länge, wegen ihres weit größeren Kapazitätsmoments $\mathfrak{C}$ viel mehr Energie $\frac{1}{2}\,\mathfrak{C}E^2$ aufnehmen und in Schwingung bringen, als die offenen Oszillatoren. Ein aus einem funkenerregten geschlossenen und einem offenen Oszillator gleicher Frequenz bestehendes lose gekoppeltes System, ein Braunscher Oszillator, hat daher den Vorzug, große Energieaufnahmefähigkeit mit großer Strahlungsfähigkeit zu vereinigen. Der nichtstrahlende geschlossene Kreis liefert die von dem gekoppelten offenen Kreise ausgestrahlte Energie, solange sein eigener Vorrat reicht, nach (vgl. **A II 5 d** β). Zwei enggekoppelte Systeme derart gestatten andererseits die Energie des geschlossenen Primärsystems sehr schnell in den gekoppelten offenen Sender zu überführen und ihn dadurch zu einer zwar kurzdauernden, aber äußerst intensiven, also gewissermaßen explosiven Ausstrahlung zu bringen.

Mit Hilfe des Strahlungswiderstandes $\mathfrak{R}_S$ läßt sich jetzt das Strahlungsdekrement $\mathfrak{b}_S$ in derselben Weise berechnen, wie das Joulesche Dekrement aus dem Leitungswiderstand nach den Beziehungen Gleichung (13).

So wird analog Gleichung (68)

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{b}_S &= \frac{\mathfrak{R}_S T}{2\mathfrak{L}} = \frac{\mathfrak{R}_S \lambda}{2\mathfrak{L} c_0} = \pi \mathfrak{R}_S \sqrt{\frac{\mathfrak{C}}{\mathfrak{L}}} \\ &= 2\pi^2 c_0 \frac{\mathfrak{R}_S \mathfrak{C}}{\lambda} \end{aligned}\right\} \quad . \ 82)$$

Für die Grundschwingung eines linearen Oszillators wird damit unter Berücksichtigung von Gleichung (81 a) und (35)

$$(\mathfrak{b}_S)_1 = \frac{2{,}44\, c_0 T}{L^{(1)} \cdot l} = \frac{2 . 2{,}44}{L^{(1)}} \quad . \ 82\,a)$$

$L^{(1)}$ hat man berechnet zu

$$L^{(1)} = 2 \operatorname{lognat} \frac{l}{\varrho} \quad . \ . \ . \ . \ 83)$$

(ϱ Drahtradius des Oszillators), also wird

$$\mathfrak{b}_S = \frac{2{,}44}{\operatorname{lognat} \frac{l}{\varrho}} \quad . \ . \ . \ 82\,b)$$

Für die Oberschwingungen ergibt sich nach Abraham

$$(\mathfrak{b}_S)_p = \frac{1}{p} (\mathfrak{b}_S)_1 \quad . \ . \ . \ . \ 82\,c)$$

Da $(\mathfrak{b}_S)_p = (\delta_S)_p T_p = (\delta_S)_p \frac{T_1}{p}$, so sieht man, daß $(\delta_S)_p = (\delta_S)_1$ sein muß d. h. alle Eigenschwingungen haben denselben Dämpfungsfaktor. Für normale $\frac{l}{\varrho}$ Werte ist $\mathfrak{b}_S$ nicht viel von 0,2 verschieden.

Auch der Wirkungsgrad von Oszillatoren läßt sich mit Hilfe des Begriffes Strahlungswiderstand exakt ausdrücken. Man hat darunter zu verstehen den Bruchteil der insgesamt verbrauchten Oszillatorenergie, der auf die Strahlung entfällt, also

$$\eta = \frac{\mathfrak{R}_S (J_b)^2_{eff}}{(\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S)(J_b)^2_{eff}} = \frac{\mathfrak{b}_S}{\mathfrak{b} + \mathfrak{b}_S} \qquad 84)$$

wo mit $\mathfrak{R}(J_b)^2_{eff}$ alle Energieverluste zusammengefaßt sind, die der Oszillator durch Joulesche Wärme, Wirbelströme usw. erleidet (vgl. **A II 5** β). Die Gleichung (84) gilt ebenso für ungedämpfte, wie für gedämpfte Schwingungen. Man sieht: je kleiner $\mathfrak{R}$ gemacht werden kann, desto größer η. Bei Funkenerregung eines Oszillators ist ein erheblicher Betrag von $\mathfrak{R}$ als Funkenwiderstand nie zu vermeiden, darum ist bei dieser Erregungsart nie ein hoher Nutzeffekt zu erzielen. Es macht dabei keinen Unterschied, ob man den Oszillator durch eine in ihn eingeschaltete Funkenstrecke direkt erregt oder durch Koppelung mit einem funkenerregten geschlossenen Kreise.

Bei der Lichtbogenmethode der Schwingungserregung sind die Verluste im Lichtbogen ebenfalls stets recht große. Relativ groß ist dagegen der Wirkungsgrad der Löschfunkenmethode, weil bei ihr der Funken nur in der kurzen Stoßerregungszeit Energie verbraucht. Von dann ab entfallen die schädlichen Energieverluste allein auf den Ohmschen Widerstand des angestoßenen Oszillators, der fast beliebig klein gemacht werden kann.

IV. Oszillatorform und Ausstrahlung.

Mit Hilfe der Gleichungen (76) und (82)

$$\mathfrak{R}_S = \frac{8}{3}\pi^2 c_0 \left(\frac{l_\alpha}{\lambda}\right)^2$$

$$\mathfrak{d}_S = \frac{\mathfrak{R}_S T}{2\mathfrak{L}} = \pi \mathfrak{R}_S \sqrt{\frac{\mathfrak{C}}{\mathfrak{L}}} = 2\pi^2 c_0 \frac{\mathfrak{R}_S \mathfrak{C}}{\lambda}$$

können wir jetzt die verschiedenen offenen Oszillatoren des Abschnittes **A II 5 c** in bezug auf ihre Strahlungseigenschaften miteinander vergleichen. Denken wir uns zunächst die in Figur 15 angedeuteten Oszillatoren so hergestellt, daß sie alle dieselbe Schwingungszeit haben. Dann muß der lineare Oszillator von allen den größten Strahlungswiderstand haben. Denn für alle anderen Formen wird die äquivalente Dipollänge kleiner. Bei den Spulenformen (Fig. 15 a und b) sieht man das ohne weiteres ein, weil bei ihnen $\alpha = \frac{2}{\pi}$ bleibt, während wegen des wachsenden $\mathfrak{L}$ die Länge l immer kleiner sein muß, wie beim linearen Oszillator. Bei den Formen Fig. 15 a′ und b′ erkennt man es aus der graphischen Konstruktion von l_α, wenn man das **A II 5 c** Gesagte beachtet. Danach haben die Endkapazitäten (vgl. Fig. 17 und 18) stets den Erfolg, daß sie von der Stromverteilungskurve ein Stück abschneiden. Darum muß auch hier l_α stets kleiner ausfallen wie bei der linearen Form Fig. 15c. Das Dekrement wird bei diesen Oszillatoren gleicher Schwingungszahl proportional $\mathfrak{R}_S\mathfrak{C}$ oder auch $\frac{\mathfrak{R}_S}{\mathfrak{L}}$. Daraus folgt, daß beim Uebergang vom linearen Oszillator zu den Spulenformen (Fig. 15 a und b) das Dekrement abnehmen muß. Denn dabei nimmt sowohl $\mathfrak{R}_S$ ab, wie $\mathfrak{C}$. Ebenso beim Uebergang zu den Formen Figur 15 a′ und b′, weil dabei $\mathfrak{R}_S$ schneller abnimmt wie $\mathfrak{L}$. Denn $\mathfrak{R}_S$ nimmt mit l quadratisch, $\mathfrak{L}$ nach Gleichung 83 linear ab (die Ströme, die in den Endkapazitäten fließen, können nur wenig zu der Selbstinduktivität $\mathfrak{L}$ beitragen).

Für die Praxis der drahtlosen Telegraphie ist es noch wichtig zu sagen, wie Strahlungswiderstand und Dekrement sich ändern, wenn man bei festgehaltener Oszillatorlänge die Oszillatorform variiert. Gleichung 76 und 82 lehren, daß mit der betreffenden Oszillatorlänge stets dann der größtmögliche Strahlungswiderstand und das größtmögliche Strahlungsdekrement entwickelt wird, wenn sie einem linearen Oszillator zugelegt wird. Uebergang zur Spulenform oder Einschalten von Spulen (künstliche Verlängerung nach **A II 5 c**) führt zur Vergrößerung von $\mathfrak{L}$ und λ, also zur Verkleinerung von l_α und $\mathfrak{d}_S$. Anhängen von Endkapazitäten vergrößert λ und läßt $\mathfrak{L}$ ziemlich unverändert. Einschalten von Kondensatoren (künstliche Verkürzung nach **A II 5 c**) verkleinert λ, verkleinert aber in noch stärkerem Maße l_α, wie ein Blick auf Figur 16a anschaulich macht. Also nimmt auch hier $\mathfrak{R}_S$ und $\mathfrak{d}_S$ ab. Schaltet man bei einem durch eine Spule verlängerten Oszillator eine Kapazität ein, welche die alte Wellenlänge wieder herstellt (Fig. 16c), so bleibt demnach l_α kleiner, $\mathfrak{L}$ größer wie beim gleichlangen linearen Oszillator, so daß stets $\mathfrak{R}_S$ und $\mathfrak{d}_S$ kleiner sind, wie bei diesem. Man nennt aus diesem Grunde diese Form „Oszillator mit verminderter Strahlungsdämpfung“.

V. Die Skala der erforschten elektromagnetischen Wellen.

Die Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen aus offenen Oszillatoren, die sich nach den vorstehend entwickelten Gesetzmäßigkeiten vollzieht, wurde von H. Hertz zuerst beobachtet. Die kürzeste Wellenlänge der Wellen, die er studierte, war etwa ½ m. An ihnen zeigte er, daß diese Wellen alle Eigenschaften besitzen, wie sie an Lichtwellen bekannt waren; daß sie nach denselben Gesetzen reflektiert, gebrochen, polarisiert, zur Interferenz gebracht werden können, wie Lichtwellen, so daß die in der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie behauptete Identität der Lichtwellen mit elektromagnetischen Aetherwellen eine durchschlagende experimentelle Bewahrheitung erfuhr. Seitdem wurde die Faraday-Maxwellsche Aethertheorie, deren Konsequenz die elektromagnetische Lichttheorie bildet, allgemein von der Physik angenommen. Sie liegt den Darlegungen dieses Artikels von vornherein zugrunde. Die Hertzschen Versuche über Strahlung von elektromagnetischen Wellen wurden später namentlich von Righi und Lebedew auf kürzere Wellen ausgedehnt und man gelangte schließlich durch Verkleinerung der Oszillatordimensionen bis zu Wellenlängen von 1,5 mm herunter. Die moderne drahtlose Telegraphie benutzt andererseits Wellenlängen bis 10000 m. Die Optik wiederum beherrscht das Gebiet vom äußersten Ultra-

violett bei 100.10^{-6} mm bis zu dem von Rubens (durch seine Reststrahlenmethode und neuerdings durch seine Fokusfiltermethode; vgl. den Artikel „Infrarot") erschlossenen Infrarot bis etwa 10^{-2} mm.

VI. Gerichtete Ausstrahlung von Oszillatoren.

Die bisher betrachteten einfachen offenen Oszillatoren strahlen in der Aequatorialebene nach allen Richtungen gleich stark. Trägt man die in einer bestimmten Entfernung r gemessenen Amplituden der elektrischen Feldstärke als Strahlen vom Oszillatormittelpunkte aus auf und verbindet die Enden durch eine Kurve, die sogenannte „Strahlungscharakteristik", so erhält man bei diesen Oszillatoren einen in der Aequatorebene liegenden Kreis. Durch Kombination mehrerer parallel gestellter Oszillatoren gleicher Schwingungszahl entstehen im Strahlungsraum Interferenzen und bewirken, daß die Strahlungscharakteristiken keine Kreise mehr sind. In diesen Fällen sind die Charakteristiken für verschiedene Entfernungen r meist nicht dieselben. Mit zunehmender Entfernung nähern sie sich aber einer endgültigen Form, welche man als die Strahlungscharakteristik der betreffenden Kombination ansprechen darf. Die Untersuchung solcher Kombinationen und ihrer Strahlungscharakteristik hat mit Rücksicht auf die drahtlose Telegraphie insoweit Interesse, als es gelingt, die Strahlung einer Oszillatorkombination nach einer bestimmten Richtung zu leiten, um dadurch eine „gerichtete drahtlose Telegraphie" zu erreichen. Bei kleinen Wellenlängen gelingt das, wie schon Hertz zeigte, in vollkommener Weise durch parabolisch-zylindrische Hohlspiegel, in deren Brennebene der Oszillator aufgestellt wird. Für die großen Wellenlängen der drahtlosen Telegraphie ist die Konstruktion der entsprechenden riesenhaften Hohlspiegel nicht wohl möglich.

Hat man (Figur 92) zwei die Papierebene

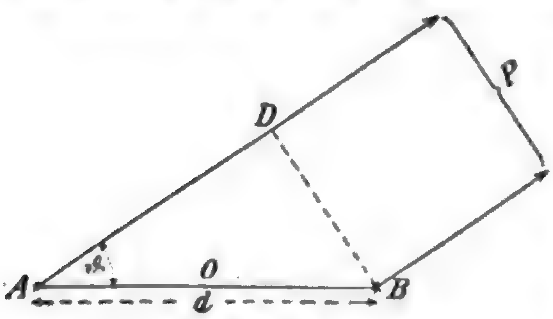


Fig. 92.*

senkrecht durchsetzende Oszillatoren A und B, deren Strahlung im Punkte P in der Richtung ϑ in großer Entfernung betrachtet wird, so ist klar, daß die von B ausgehende Welle in P um $\frac{AD}{c_0}$ sec $= \frac{d\cos\vartheta}{c_0}$ sec früher ankommt, wie die von A ausgehende. Die Welle A hat also in P beim Zusammentreffen mit Welle B eine Phasennacheilung

$$\varphi = \frac{\omega . d\cos\vartheta}{c_0} = \frac{2\pi\, d\cos\vartheta}{\lambda},$$

abgesehen von der Phasendifferenz ψ, welche etwa die beiden Schwingungen schon an sich haben. Sie setzen sich in P zu einer resultierenden Feldstärke zusammen, deren Größe und Phase man aus den Komponenten durch die Konstruktion des Vektordiagramms Figur 93 findet. Ist z.B. OB $= \mathfrak{E}_B$

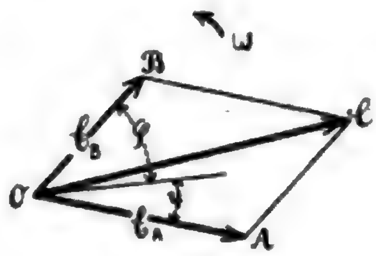


Fig. 93.

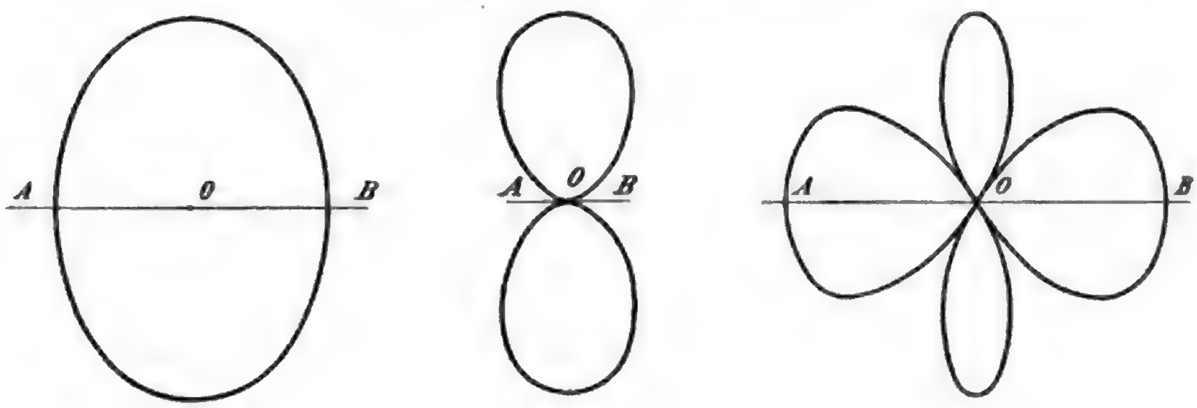
der Vektor, dessen Drehung um O die Feldstärke e_B im Punkte P darstellt, so muß $O_A = \mathfrak{E}_A$ um $\varphi + \psi$ gegen OB rückwärts verschoben aufgetragen werden, falls wir dem Strom in A eine Phasennacheilung von ψ gegen den in B zuschreiben. Dann stellt OC den Vektor des resultierenden Feldes dar. Macht man diese Konstruktion für bestimmte Stromstärken in A und B und für alle Winkel ϑ, so ergibt sich die Strahlungscharakteristik.

Die Stromamplituden in A und B sollen gleich sein, dann sind folgende Fälle von Interesse:

a) $\psi = 0^0$. Dann ergibt sich das in der Figur 94 a, b, c für verschiedene d-Werte dargestellte Verhalten. Wenn $d = \frac{\lambda}{2}$ wird, hat man nach den beiden zur Ebene der Oszillatoren senkrechten Richtungen eine beträchtliche Richtwirkung der Strahlung.

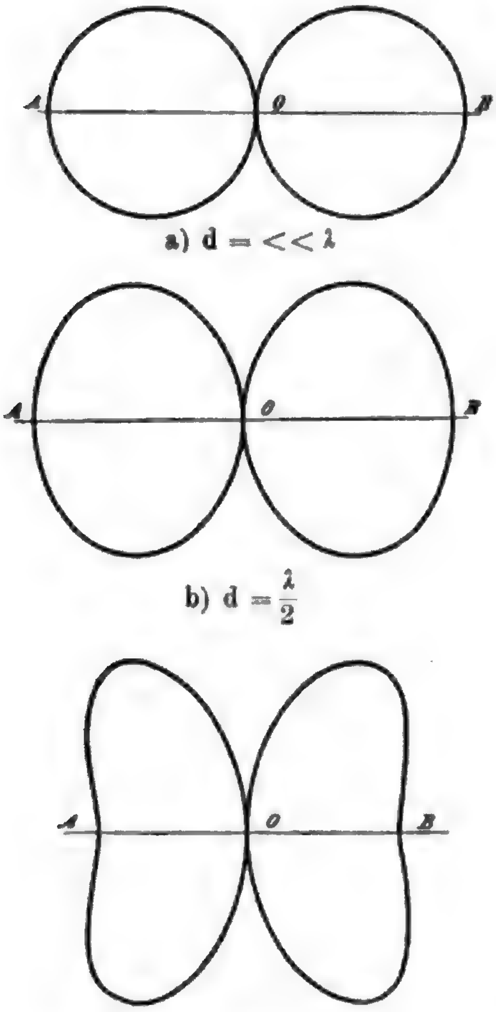
b) $\psi = 180^0$. Dann ergibt sich das in der Figur 95 a, b, c für verschiedene d-Werte dargestellte Verhalten. Je kleiner $\frac{d}{\lambda}$ ist, desto genauer besteht die Charakteristik aus zwei Kreisen, die eine Richtwirkung in den in der Ebene der Oszillatoren liegenden Richtungen dokumentieren.

c) $\psi = \pi \pm \frac{2\pi d}{\lambda}$. In diesem Falle kommt eine von A ausgehende Welle bei B gerade



a) $d = \frac{\lambda}{4}$ b) $d = \frac{\lambda}{2}$ c) $d = \lambda$

Fig. 94.*



a) $d = << \lambda$

b) $d = \frac{\lambda}{2}$

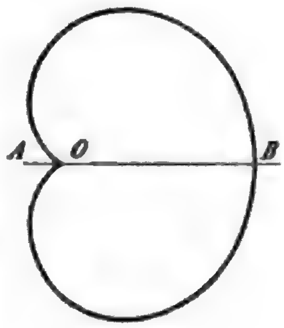
c) $d = \frac{\lambda}{4}$

Fig. 95.*

mit einer solchen Phase an, daß sie die von B ausgehende Welle aufhebt, oder umgekehrt.

Die Charakteristik wird in diesem Fall von dem Typus der Figur 96, wobei die Bevorzugung der Strahlung in der Ebene der Oszillatoren um so größere wird, je kleiner wieder $\frac{d}{\lambda}$.

Aehnliche Wirkungen kann man nach Zenneck bekommen, wenn man in geringem Abstande von einem Oszillator A einen zweiten gleichen B aufstellt. In diesem werden dann von dem ersten aus Resonanzschwingungen induziert, deren Interferenz mit der Schwingung in A analoge Richtwirkungen ergeben muß, wie oben beschrieben. Auch mit mehr als zwei Oszillatoren, deren Schwingungen mit geeigneter Phasenverschiebung erfolgen, lassen sich nach F. Braun Richtwirkungen erzielen. Der Idealfall wäre der, daß in einem System parabolisch-zylindrisch angeordneter Oszillatoren die Schwingungen in derjenigen Phase erregt würden, wie sie an dem Orte jedes Oszillators eine Welle haben würde, die von einem in der Brennlinie des parabolischen Zylinders aufgestellten Oszillator ausginge. Der Effekt müßte dann direkt eine Scheinwerferwirkung sein. Zur Erregung solcher Schwingungen beliebig versetzter Phase sind verschiedene Methoden



$d = \frac{\lambda}{4}$

Fig. 96.*

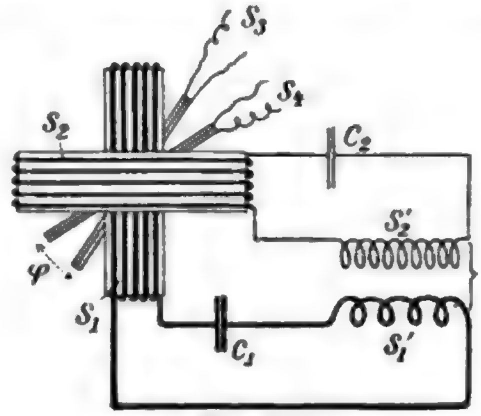


Fig. 97.*

angegeben worden. Ein sehr einfacher Weg bietet sich bei ungedämpften Schwingungen. Jede der beiden gekreuzten Spule S_1 u. S_2 Figur 97 gehört einem Schwingungskreise an. Im Schwingungskreise 1 werden ungedämpfte Schwingungen erregt. Schwingungskreis 2 ist mit 1 bei S_1^1 S_2^1 gekoppelt, so daß sein Strom um 90° gegen Strom 1 verschoben ist. Infolgedessen entsteht in dem Spulenraum ein magnetisches Drehfeld von der Drehfrequenz ω. Spulen S_3 und S_4... erfahren dann EMKK, deren Phasendifferenz durch den Winkel φ bestimmt ist.

E. Absorption elektromagnetischer Wellen durch Oszillatoren.

Die Elektronen eines Oszillators, der in den Gang einer elektromagnetischen Welle hineingestellt wird, erfahren von der elektrischen Kraft der Welle einen periodischen Antrieb. Steht der Oszillator so, daß dieser Antrieb eine Komponente in der Richtung der Oszillatorachse hat, so setzen sich die Antriebe längs des ganzen Oszillators zu einer periodischen EMK zusammen und es wird in dem Oszillator durch die Welle eine Schwingung erzwungen.

Man sieht, daß die EMK, welche beim Strahlungsvorgang dem Strome Energie entzieht, um sie als Strahlungsenergie auf den Aether zu übertragen, in diesem Falle umgekehrt dem Aether Energie entnimmt und sie dem Strome überträgt; sie tritt also dort als Verbraucher EMK, hier als Generator EMK in Erscheinung. Für die auf diese Art erzwungenen Schwingungen gelten natürlich dieselben Gesetze, wie wir sie Abschnitt **A II 5 d** α bei loser Koppelung zweier Systeme kennen gelernt haben. Der Vorgang ist ja ganz der gleiche, wie dort: die von dem Strahlungsfelde ausgeübte periodische EMK hat in jedem Moment an dem Oszillator die Aenderung des elektrischen Feldes $i\int\frac{idt}{\mathfrak{C}}$, die Aenderung des magnetischen Feldes $i\mathfrak{L}\frac{di}{dt}$ und die Jouleschen Wärmeverluste $i^2\mathfrak{R}$ zu decken. Die betreffende EMK erhalten wir aus folgender Ueberlegung, alles bezogen auf den äquivalenten Dipol: Wäre der Oszillator schwingungsfrei, so wirkte auf ihn die Strahlung mit der EMK

$$e = \mathfrak{E} l_\alpha \sin \omega t = E \sin \omega t$$

wo $\mathfrak{E}$ die Amplitude der Wellenfeldstärke in Richtung der Oszillatorachse ist (vgl. **D III**). Schwingt der Oszillator, so strahlt er aber auch selber in den Raum hinaus, und sein Strahlungsfeld lagert sich über das primäre Strahlungsfeld, in das er eingebettet ist. Das resultierende Strahlungsfeld ist es, welches die treibende EMK zur Erregung des Oszillators liefert und gewissermaßen Energie auf ihn zusammendrängt. Man kann das nach Rüdenberg auch so ansehen: Als treibende EMK wird die auf den schwingungsfrei gedachten Oszillator ausgeübte $e = E \sin \omega t$ gesetzt. Sie hat in jedem Moment einerseits die oben genannten Leistungen zu decken, andererseits aber auch die Ausstrahlung, welche nach dem vorigen Abschnitt Gleichung (73) $-i\frac{\mathfrak{S}d^2i}{dt^2}$ beträgt. Somit ergibt sich folgende Gleichung für die Energiebilanz des Problems

$$E i \sin \omega_1 t = \frac{i\int idt}{\mathfrak{C}} + i^2\mathfrak{R} + i\mathfrak{L}\frac{di}{dt} - \mathfrak{S}i\frac{d^2i}{dt^2} \qquad 85)$$

ω_1 ist die Kreisfrequenz des Strahlungsfeldes. Die dadurch bestimmten Vorgänge verlaufen, analog den bei den gekoppelten Systemen Abschnitt **A II 5 d** α betrachteten, wie folgt: In dem Maße als der Oszillator mit Hilfe seiner reversiblen EMKK $\frac{\int idt}{\mathfrak{C}}$ und $\frac{\mathfrak{L}di}{dt}$ dem Strahlungsfelde elektromagnetische Schwingungsenergie entnimmt und selbst in Schwingung kommt, steigern sich die Energieverluste, die ihm alsbald durch die irreversiblen EMKK $i\mathfrak{R}$ und $\frac{\mathfrak{S}d^2i}{dt^2}$ zugefügt werden. So muß nach einer gewissen „Einschwingungszeit" ein stationärer Zustand eintreten, bei dem die aus dem Strahlungsfelde absorbierte Energie nicht mehr weiter zur Verstärkung der Schwingungen, sondern nur noch zur Deckung jener Verluste verbraucht wird. Für diesen stationären Zustand ergibt sich in Analogie zu Gleichung (42) die Amplitude der erzwungenen Schwingung zu

$$J_2 = \frac{E}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - 1\right]^2 \mathfrak{L}^2\omega_1^2 + [\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S]^2}} \qquad 86)$$

$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{\mathfrak{L}\mathfrak{C}}}$ ist die Kreisfrequenz der Eigenschwingung des absorbierenden Oszillators, $\mathfrak{R}_S = \mathfrak{S}\omega_2^2$ der Strahlungswiderstand desselben.

Die im Mittel einer Periode im Oszillator in Wärme verwandelte Energie ist

$$\mathfrak{R} J_{eff}^2 = \frac{1}{2} E^2 \frac{\mathfrak{R}}{\left\{\left[\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - 1\right] \mathfrak{L}\omega_1\right\}^2 + \left\{\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S\right\}^2} \qquad 87)$$

Die durch Strahlung in den Raum zerstreute mittlere Energie wird

$$L_S = \frac{1}{T}\int_0^T i\,\mathfrak{S}\frac{d^2 i}{dt^2}\,dt = \mathfrak{R}_S J_{eff}^2$$

$$= \frac{1}{2} E^2 \frac{\mathfrak{R}_S}{\left\{\left[\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - 1\right]\mathfrak{L}\omega_1\right\}^2 + \left\{\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S\right\}^2} \qquad 86)$$

Im stationären Zustand wird also die Summe dieser beiden Leistungen durch die Energieabsorption dem Strahlungsfelde entnommen.

Man sieht, daß beide ein Maximum werden, wenn $\omega_2 = \omega_1 = \omega$, d. h. wenn der Oszillator zur Resonanz mit der Welle gebracht wird. Alsdann wird die Amplitude des Stromes

$$J_2 = \frac{E}{\mathfrak{R} + \mathfrak{S}\omega^2} = \mathfrak{E}\frac{(l_\alpha)_2}{(\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S)_2} =$$

$$\mathfrak{E}\frac{(l_\alpha)_2}{\mathfrak{R}_2 + \frac{8}{3}\pi^2 c_0 \frac{(l_\alpha)_2^2}{\lambda^2}} \quad \dots . \ 89)$$

wenn $\mathfrak{R}_S$ aus Gleichung 76 eingeführt wird.

$\mathfrak{E}$ wird am größten, wenn der Empfangsoszillator in die Aequatorialebene des Senderoszillators und diesem parallel gestellt wird. Alsdann wird nach Gleichung (81

$$\mathfrak{E} = \frac{(l_\alpha)_1 (J_b)_1 \omega_1}{r}, \text{ also}$$

$$J_2 = (J_b)_2 = \frac{(J_b)_1\omega_1}{r}\frac{(l_\alpha)_1 (l_\alpha)_2}{(\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S)_2} =$$

$$\frac{3c_0(l_\alpha)_2}{2\omega_1 r}\frac{(\mathfrak{R}_S)_1}{(\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S)_2}(J_b)_1.$$

Was diese Gleichungen vor allem lehren, ist die Tatsache, daß auch für die Empfangsstromstärke J_2 und damit für die absorbierte Energie $\mathfrak{R}_S(J_2)^2_{eff}$ der Strahlungswiderstand wesentlich mitbestimmend ist. Das Maximum von J_2 wird erhalten, wenn $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_S$, wenn also der Ohmsche gleich dem Strahlungswiderstand gemacht wird. Mit anderen Worten, wenn ebensoviel von der absorbierten Energie in Wärme verwandelt wie durch Ausstrahlung zerstreut wird. Somit ergibt sich zu jedem $\mathfrak{R}$ ein günstigster Wert der äquivalenten Dipollänge $(l_\alpha)_2$

$$(l_\alpha)_2 = \frac{\lambda}{2\pi}\sqrt{\frac{\mathfrak{R}}{2c_0}} \quad \dots\dots \ 91)$$

den man im Resonanzfalle wählen muß, um die stärkste Energieabsorption zu erhalten.

Mißt man die Stromstärke J_2 durch ein Hitzdrahtinstrument, wobei man natürlich möglichst den ganzen Widerstand $\mathfrak{R}$ als wirksamen Widerstand in das Instrument konzentriert, so ist für seinen Ausschlag $\frac{1}{2}J_2^2\,\mathfrak{R}$ maßgebend. Es wird für $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_S$

$$\frac{1}{2}(J_2)_{max}^2\,\mathfrak{R} = \frac{3}{16\pi}\mathfrak{E}^2\frac{\lambda^2}{c_0}\mathfrak{R} \quad . \ . \ 92)$$

also theoretisch unabhängig von l_α und damit von der Länge und besonderen Form des Empfangsoszillators; es ist aber proportional dem Quadrate der Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Da die entwickelte Wärme dem $\mathfrak{R}$ proportional ist, so wird man bei Hitzdrahtmessung von J_2 möglichst lineare Oszillatoren als Empfänger verwenden, da bei ihnen $\mathfrak{R}_S$ am größten ist und infolgedessen ein entsprechend großes $\mathfrak{R}$ zulässig ist, um $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_S$ zu machen.

Kommt es allerdings darauf an, einen Empfangsoszillator auf die einfallenden Wellen recht scharf abzustimmen, so ist die Oszillatorform nicht mehr gleichgültig. Wie Fig. 76 zeigt, nimmt ja die Resonanzschärfe mit zunehmender Dämpfung ab, also muß bei der Forderung großer Abstimmschärfe eine kleine Strahlungsdämpfung und kleiner Strahlungswiderstand des Empfangsoszillators gewählt werden. Man begnügt sich dann mit einer geringeren Energieabgabe an den Hitzdraht. Ist sein $\mathfrak{R}$ sehr klein gegen $\mathfrak{R}_S$, so wird nun

$$\frac{1}{2}\mathfrak{R}(J_2)^2 = \frac{\mathfrak{R}}{2\mathfrak{R}_S}E^2 = \frac{9E^2\lambda^4}{128\pi^4 c_0^2 l_\alpha^2} \quad . \ . \ . \ 93)$$

Hier ist eine große Wellenlänge und ein kleines l_α von Vorteil.

Ist die Strahlung gedämpft, so sind der Gleichung 44 analoge anzuwenden und man erhält, wenn $\omega_2 = \omega_1$ und $\mathfrak{d}_2 = \pi\frac{(\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S)}{\omega_1 \mathfrak{L}_2}$ (Gleichung 27) eingesetzt wird.

$$(J_2)^2_{eff}\mathfrak{R} = \frac{E^2\mathfrak{R}_2}{(\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S)_2^2}\frac{\pi}{2\omega_1\mathfrak{d}_1}\frac{\mathfrak{d}_2}{\mathfrak{d}_1 + \mathfrak{d}_2} \quad . \ . \ . \ 94)$$

Die oben gegebenen Erörterungen sind in diesem Falle entsprechend zu modifizieren.

F. Anwendungen der elektrischen Schwingungen.

I. Die Prinzipien der drahtlosen Telegraphie.

1. Allgemeines. Bald nach der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz wurden die Versuche begonnen, sie zur drahtlosen Signalgebung zu benutzen. Der erste, der damit Erfolg auf größere Entfernungen erzielte, war der Italiener Marconi. Durch die nun einsetzende intensive Tätigkeit, die drahtlose Telegraphie zu entwickeln, erhielt die Forschung auf dem Gebiete der elektrischen Schwingungen einen äußerst nachhaltigen Impuls. Sehr viele von den Erkenntnissen, die in den vorigen Abschnitten mitgeteilt sind, verdanken wir dieser Anregung des praktischen Problems.

In diesem Abschnitt soll in großen Zügen darüber berichtet werden, wie unter Verwertung dieser Erkenntnisse eine drahtlose

Telegraphie und Telephonie durchgeführt wird. Auf die zahllosen Konstruktionseinzelheiten kann natürlich nicht eingegangen werden.

Das Grundprinzip ist folgendes: An der Stelle der Erde, wo ein Signal entsandt werden soll, wird ein Oszillator zum Schwingen gebracht, der so beschaffen und angeordnet ist, daß er möglichst intensive elektromagnetische Wellen entsendet, eventuell nur in der Richtung, in der die empfangende Station liegt. Die gesamte Apparatur, welche zum Aussenden der Wellen gebraucht wird, heißt „Sender". Auf der Station, für welche die Signale bestimmt sind, wird ein Empfangsoszillator so in den Weg der Wellen gestellt, daß er sie möglichst stark absorbiert. Der dadurch erzwungene Strom wird mit Hilfe irgendeines der Abschnitt **C II 1** und **2** beschriebenen Detektoren beobachtet und zum Zeichenempfang ausgenutzt. Diese ganze Apparatur heißt „Empfänger". Da die Oszillatoren nach den Erörterungen der beiden vorhergehenden Abschnitte **D** und **E** in der Aequatorialrichtung am stärksten strahlen, so sieht man ohne weiteres ein, daß eine zur Erdoberfläche senkrechte Stellung der Oszillatoren die Zweckmäßigste ist. Sie ist es auch deshalb, weil in allen anderen Fällen die Verluste, welche durch die Nähe der gutleitenden Erde entstehen, größer werden.

2. Die normalen Antennen. Die großen Oszillatoren, welche man für die drahtlose Telegraphie auf große Entfernung benötigt, heißen Antennen. Es sind Drahtgebilde wechselnder Form, die isoliert an Holz- oder Eisenmasten aufgehängt werden. Im allgemeinen werden dieselben Antennen zum Senden und Empfangen benutzt. Wie im Abschnitt **B** gezeigt wurde, findet die Erregung der Schwingungen eines Oszillators am zweckmäßigsten im Strombauche statt. Um das in einfacher Weise bewerkstelligen zu können, verwendet man die Antennen so, daß der Strombauch an die Erdoberfläche zu liegen kommt. Das geschieht unter Ausnutzung des Abschnitt **A II 5 c** erwähnten Kunstgriffes: man ersetzt die untere Hälfte des Oszillators durch eine große Kapazität. Als solche bietet sich ohne weiteres die Erde dar. Also braucht man nur die Antennen an ihrem unteren Ende mit der Erde gutleitend zu verbinden, zu „erden", dann erfolgt die Grundschwingung so, wie Figur 18 zeigt. Statt der Erdverbindung wird häufig, namentlich auf trockenem Erdreich, die Verbindung mit einem ausgedehnten Netz über dem Erdboden ausgespannter Drähte bevorzugt (kapazitive Erdung). Diese bilden alsdann den kapazitiven Ersatz der wegfallenden unteren Antennenhälfte. Die letztere Art der Erdung liefert geringere Erdungsverluste, wie die erstere, bei der teils der Leitungswiderstand des Erdreiches, teils Wirbelströme in der Erde, eine nicht unerhebliche schädliche Dämpfung bedingen.

Die heute verwendeten wichtigsten Antennenformen sind: An drei oder vier Masten aufgehängte Schirmantenne, bestehend aus einem vertikalen Drahtgebilde (Reuse), an das sich oben ein horizontaler schirmartiger Teil anschließt. Sie entspricht der Oszillatorform Figur 15a'. Von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie wird die Schirmantenne mit einem einzigen Eisenmast in

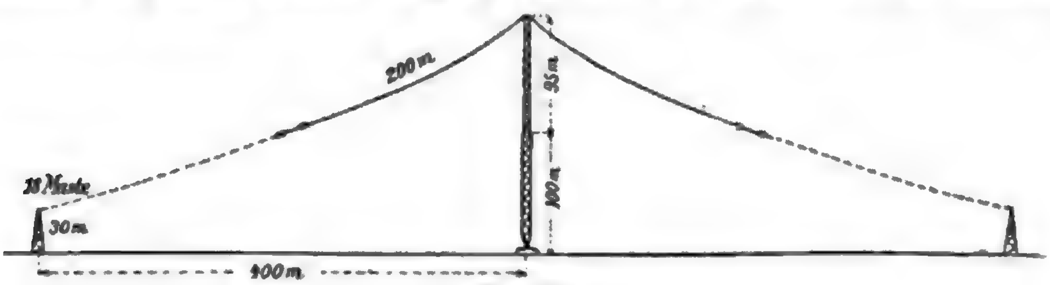
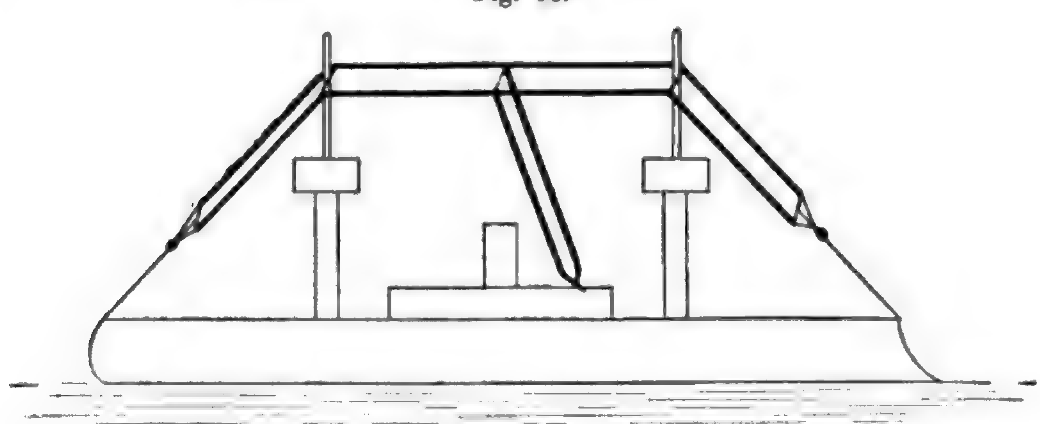


Fig. 98.*


Fig. 99.*

der Mitte in der Figur 98 schematisch dargestellten Art ausgeführt. Der Mast der in dieser Art ausgeführten Station Nauen ist 250 m hoch. Der Eiffelturm in Paris wird gleichfalls für die Zwecke der drahtlosen Telegraphie ausgenutzt. Da es bei ihm nicht gut möglich ist, einen Schirm anzubringen, so entspricht seine Antenne einem gradlinigen Oszillator; sie hat also ein sehr großes Strahlungsdekrement. Aus diesem Grunde sind die Wellen, die er entsendet, relativ stark gedämpft und haben eine große Resonanzbreite. Das hat zur Folge, daß es keiner scharfen Resonanzeinstimmung des Empfängers bedarf, um sie wahrzunehmen; sie stören daher den drahtlosen Verkehr anderer Stationen mehr, als es eine Schirmantenne tut. Für Wasserschiffe kommen heute meist sogenannte T-Antennen zur Anwendung, wie in Figur 99 angedeutet. Bei ihnen ist die Erdung besonders leicht zu machen, man braucht das untere Ende nur mit dem eisernen Schiffskörper zu verbinden.

In Luftschiffen mit Metallgondeln oder Metallgerippen (Zeppelin) verwendet man herabhängende Drähte, deren oberes Ende mit der Metallgondel oder dem Metallgerippe verbunden ist oder die, wie Figur 100

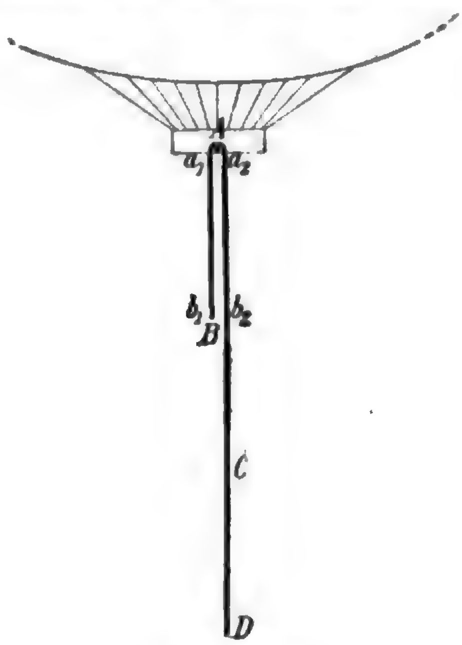


Fig. 100.*

zeigt, eine Art Lecherschen Drahtsystems, mit ungleich langen Drähten bilden, so daß das überhängende Drahtende gerade ½ Wellenlänge aufnimmt (Beggerow). Nur das überhängende Ende kann dabei strahlen oder absorbieren. Uebrigens lassen sich auch mit Horizontalantennen, z. B. von der Anordnung Figur 101, wie Kiebitz zeigte, nicht unbedeutende Reichweiten erzielen. Um die schädliche Dämpfung der Antennen möglichst klein zu machen, sind alle **A II 5** β zusammengestellten Gesichtspunkte zu beachten. Man verwendet statt einzelner Drähte meist aus Litzendrähten zusammengesetzte Drahtgebilde (Reusen) von relativ großem Durchmesser.

Da bei den geerdeten Antennen nur die eine Hälfte des Strahlungsraumes ausgenutzt wird, so ist als Strahlungswiderstand bei ihnen immer nur die Hälfte des Wertes einzusetzen, den wir Abschnitt **D 1** für die vollständigen Oszillatoren gefunden haben. Um die Schwingungszahl der Antennen unabhängig von ihrer Höhe allen Bedürfnissen anpassen zu können, werden die Abschnitt **A II 5 c** genannten Hilfsmittel, Einschaltung von Spulen zur Verlängerung, von Kapazitäten zur Verkürzung, von beiden zur Verminderung der Strahlungsdämpfung usw. verwendet. Dabei finden, um diese Variationen stetig vornehmen zu können, die Abschnitt **A II 5 a** γ beschriebenen Variometer die ausgedehnteste Anwendung.

Zur Messung von Schwingungszahl, Kapazitätsmoment, Dekrement, Stromverteilung usw. der Antennen werden die Abschnitt **C** beschriebenen Methoden in geeigneter Form herangezogen. Besonders die Wellenmesser sind dabei unentbehrliche Hilfsinstrumente geworden. Der Strahlungswiderstand von Schirmantennen ist von M. Reich in folgender Weise gemessen worden: Er berechnete zunächst die äquivalenten Dipollängen einer Schirmantenne bei den verschiedensten Neigungswinkeln ihrer Schirmdrähte durch das Abschnitt **D 1** angegebene graphische Verfahren, nachdem er die Stromverteilung in der Antenne durch eingeschaltete Ampermeter ermittelt hatte. Dann maß er die zusammengehörigen Werte der Stromstärken $(J_1)^2_{eff}$ und $(J_2)^2_{eff}$ im Bauche der Senderantennen (1) und einer in genügendem Abstande aufgestellten Empfangsantenne (2). Da nach Gleichung (92).

$$(J_2)^2_{eff} = K_1 \mathfrak{E}^2$$

und nach Gleichung 81a) $\mathfrak{E}^2 = K_2 (J_1)^2_{eff} \mathfrak{R}_S$

$$\text{so ist } \mathfrak{R}_S = K_3 \frac{(J_2)^2_{eff}}{(J_1)^2_{eff}} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 96)$$

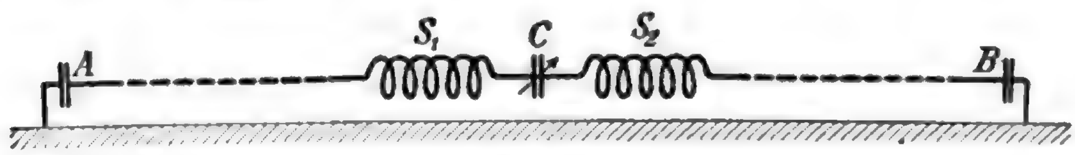


Fig. 101.*

K_1, K_2, K_3 sind Proportionalitätsfaktoren. Ermittelt man noch durch eine Messung der Gesamtdämpfung, der Schwingungszahl und des Kapazitätsmomentes nach Beziehung 68 den Gesamtwiderstand $\mathfrak{R}$ der Senderantenne, so gilt, wenn $\mathfrak{R}_0$ den Widerstandsanteil bedeutet, der nicht Strahlungswiderstand ist,

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_0 + \mathfrak{R}_S = \mathfrak{R}_0 + K_2 \frac{(J_2)^2_{eff}}{(J_1)^2_{eff}} \quad . \; . \; . \; 97)$$

Nach einer Variation der Schirmneigung, wobei $\mathfrak{R}_0$ nicht verändert wurde,

$$\mathfrak{R}' = \mathfrak{R}_0 + \mathfrak{R}_S' = \mathfrak{R}_0 + K_2 \frac{(J_2')^2_{eff}}{(J_1')^2_{eff}} \quad . \; . \; 97a)$$

woraus sich der Faktor K_2 ermitteln und dann nach Gleichung 96) $\mathfrak{R}_S$ berechnen läßt.

3. Einfluß der Erde und Erdatmosphäre auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen. Wenn die Erdoberfläche sehr gut leitend ist, wie auf dem Meere, so pflanzen sich die Wellen von den Antennen aus genau so fort, als sei der Oszillator vollständig und stehe im freien Raum. Es fällt dabei lediglich die untere, in Figur 102 gestrichelte Halbkugel des Strahlungsfeldes fort, die Kraftlinien schließen sich in der Erdoberfläche durch Leitungsströme. Dabei wird von der Erdkrümmung zunächst einmal abgesehen. In großer Entfernung steht also stets die elektrische Feldstärke senkrecht auf dem Erdboden, die magnetische liegt dem Erdboden parallel in Kreisen um die Antenne. Beide sind gleichphasig. (Vgl. Gleichungen 80b.) Ist die Leitfähigkeit der Erdoberfläche verhältnismäßig klein, wie z. B. schon bei Süßwasser und noch mehr bei trockenem Boden, so ändern sich die Verhältnisse um so mehr, je kleiner die Dielektrizitätskonstante des Bodens ist. Die von Sommerfeld und seiner Schule entwickelte Theorie sagt dann folgendes aus: Ueber die Wellen, wie sie sich unabhängig von dem Vorhandensein des Erdbodens ausbreiten würden, die „Raumwellen", lagern sich „Oberflächenwellen" von der Art der Wellen, wie wir sie längs Drähten, z. B. längs eines Lecherschen Drahtsystems kennen. Die Energie der ersteren nimmt proportional $\frac{1}{r^2}$, die der letzteren proportional $\frac{1}{r}$ ab, in großer Entfernung müssen die Wellen also mehr und mehr den Charakter der Oberflächenwellen annehmen. Das tritt bei um so kleinerer Entfernung ein, je kleiner die Wellenlänge der Schwingung und je geringer das Leitvermögen und die Dielektrizitätskonstante des Bodens ist. Die Richtung der magnetischen Feldstärke ist nicht verändert, aber die elektrische steht nach Zenneck nicht mehr senkrecht zur Erdoberfläche, sondern ist in der Richtung der Fortpflanzung geneigt, d. h. es kommt zu der vertikalen Komponente eine radial

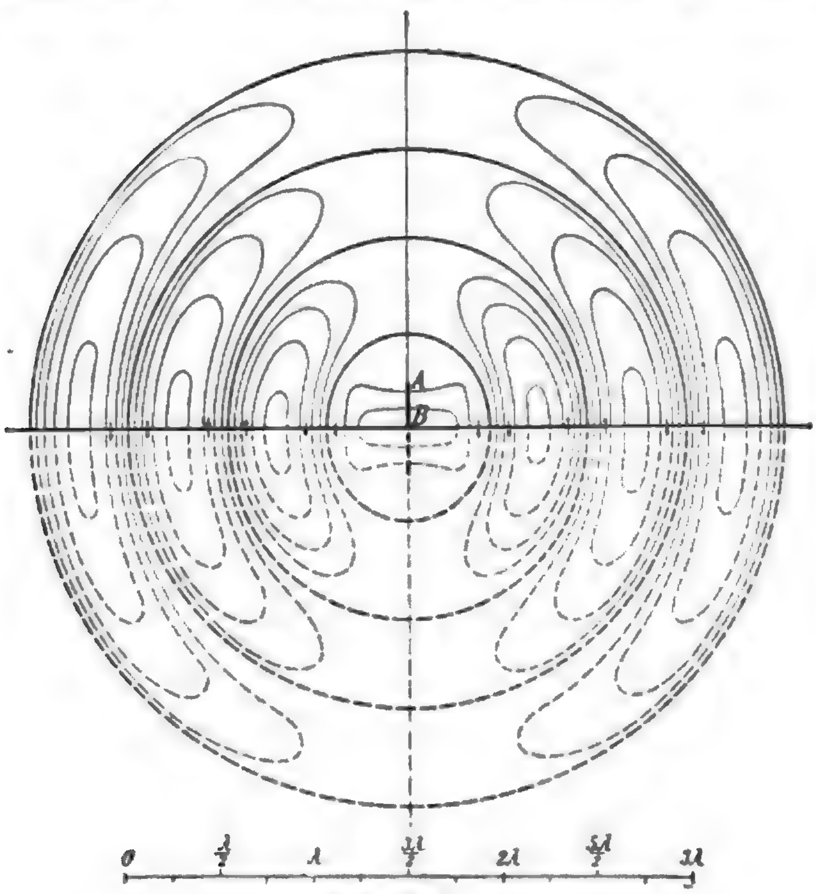


Fig. 102.*

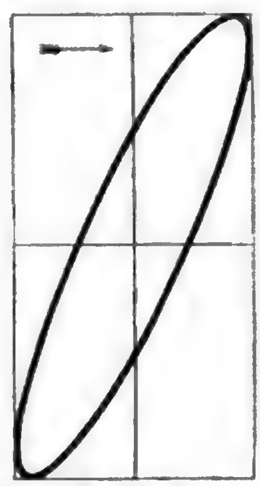


Fig. 103.*

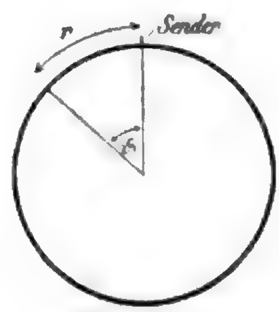


Fig. 104.*

gerichtete hinzu, die bei kleiner Dielektrizitätskonstante eine Phasendifferenz gegen die vertikale Komponente hat. Daher haben wir in diesem Falle ein elektrisches Drehfeld von dem Charakter, wie er in dem Vektordiagramm Figur 103 angedeutet ist. Der Pfeil bedeutet die Fortpflanzungsrichtung der Welle. Die Abnahme der Wellenamplitude mit dem Abstande r von der Antenne erfolgt um so langsamer, je größer das Leitvermögen und die Dielektrizitätskonstante des Bodens ist. In besonders hohem Maße aber hängt sie von der Wellenlänge ab; bei sehr gut leitendem Boden ist sie proportional $\frac{1}{\lambda^2}$, bei schlecht leitenden proportional $\frac{1}{\lambda}$. Somit ist große Wellenlänge für die Fortpflanzung sehr günstig.

Der Abfall ist auf Land beträchtlich viel größer, und zwar ist der Unterschied für dieselbe Entfernung um so größer, je kleiner die Wellenlänge ist. Eine kurze Strecke über Land kann also die Wellen mehr schwächen als eine große Strecke über See.

Die Erdkrümmung modifiziert diese Verhältnisse in zweierlei Hinsicht: a) dadurch, daß die von den Wellen bei ihrem Laufe benutzte Oberfläche sich bei der Kugel nach einem ganz anderen Gesetze ändert, als bei der Ebene. Sie nimmt bei der Kugel zunächst zu, bis der Abstand r einem Erdquadranten gleich ist, dann wieder ab bis zu dem der Antenne antipoden Punkte der Erde. b) Dadurch, daß von der gekrümmten Fläche aus eine Zerstreuung der Strahlung in den Raum stattfindet. Für gutleitende Oberflächen hat man beide Einflüsse in dem Gesetze für die Amplitude

$$\mathfrak{E} = \frac{\mathfrak{E}_0}{r}\sqrt{\frac{\vartheta}{\sin\vartheta}} \cdot \varepsilon^{-0{,}0019\frac{r}{\sqrt[3]{\lambda}}} \quad . \quad 98)$$

zum Ausdruck bringen können. Dabei ist $\mathfrak{E}_0$ die Amplitude an der Antenne, ϑ der Zentriwinkel der Erdkugel, der zu jedem r gehört (vgl. Fig. 104). Die Beobachtungen stehen mit allen diesen Gesetzen in befriedigendem Einklang.

Unebenheiten der Erdoberfläche, wie Berge stören die Wellenausbreitung unter Umständen recht erheblich. Sie geben auch gelegentlich zu Beugungserscheinungen und so gewissermaßen zur Bildung von Wellenschatten Anlaß. Bäume und Wälder absorbieren die Wellen stark; die Bäume wirken offenbar als Empfangsoszillatoren. Mit Vorliebe suchen nach alledem die Wellen die Seewasserwege. Müssen sie über Land, so zeigt es sich von größtem Vorteil, wenn Flußläufe benutzt werden können. Beim Uebergang von Wasser auf Land und umgekehrt müssen Reflexionen und eventuell Richtungsänderungen eintreten, wobei die Uferform eigentümliche Komplikationen und Ausnahmezustände veranlassen kann.

Es ist zuerst von **Marconi** beobachtet und dann von anderen bestätigt worden, daß die Wirkung desselben Senders bei Nacht viel größer sein kann, als bei Tag. Dabei ist die Wirkung bei Tage sehr konstant, die Wirkung bei Nacht recht unregelmäßig. Große Wellenlängen scheinen bei Tage günstiger zu sein, kleinere bei Nacht. Bei dem Verkehr über den Atlantischen Ozean zwischen Clifden und Glace bay machen sich überdies Sonnenaufgang und -Untergang in komplizierter Weise bemerkbar. Ein Teil dieses Einflusses entfällt wohl auf die Wirkungen, die das Licht auf die Sende- und Empfangsantennen ausübt, indem z. B. der lichtelektrische Effekt das Sprühen begünstigt und so den Wirkungsgrad verkleinert. Ein anderer Teil geht aber fraglos auf die wechselnde Beschaffenheit der Atmosphäre. Vermutlich wird der Ionisationszustand der Luft vor allen Dingen bestimmend sein. Manche meinen, daß die höchsten von der Sonnenstrahlung sehr stark ionisierten Luftschichten die untere Atmosphäre als eine gutleitende Kugelfläche umgeben, so daß sich die Wellen dort ebenso anheften können, wie auf der Erdoberfläche. Sie würden sich also in dem zwischen diesen beiden leitenden Flächen verbleibenden Raume ausbreiten und von ihnen zusammengehalten. Daß in diesem Falle eine Veränderung des Ionisationszustandes, wie er nachts fraglos auftritt, eine Rolle spielen muß, ist klar. Freilich sollte man dabei in der Nacht eher eine Verschlechterung der Uebertragung als eine Verbesserung erwarten. Eine befriedigende Erklärung jener atmosphärischen Einflüsse ist somit noch nicht gegeben.

4. Antennen für gerichtete Telegraphie. Die Abschnitte D, VI erörterten Prinzipien, durch die sich eine Richtwirkung der Strahlung von Oszillatoren erzielen läßt, finden z. B. bei folgende Antennenanordnungen ihre Anwendung: Figur 105 zeigt, wie der günstige Fall zweier gleichen Antennen



Fig. 105.

im Abstande einer halben Wellenlänge mit Strömen gleicher Amplituden, aber entgegengesetzter Phase, bequem durch einen einzigen Oszillator realisiert werden kann. Technisch vorteilhafter ist die Anordnung von **Bellini** und **Tosi**, welche Figur 106

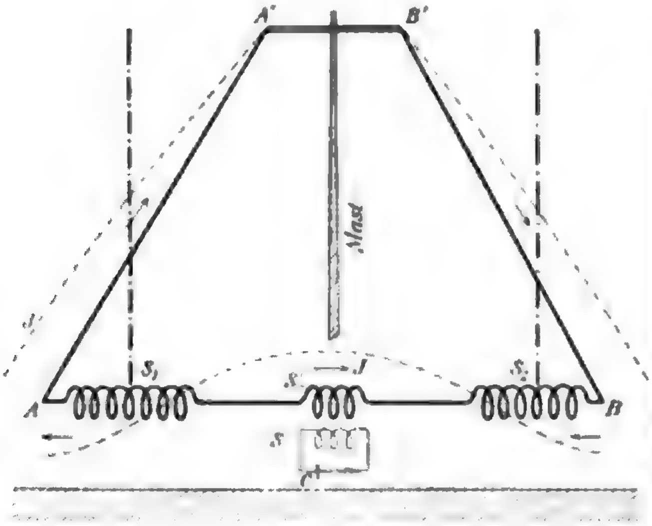


Fig. 106.*

andeutet. Die beiden Antennen sind gegeneinander geneigt und können so von einem Maste getragen werden. Um die Richtung der Ausstrahlung, deren Charakteristik so ist wie Figur 95b zeigt, beliebig verdrehen zu können, ohne dabei die Antennenachsen zu drehen, verwenden **Bellini** und **Tosi** zwei gekreuzte Antennenpaare A B und A_1B_1, wie Figur 107 angedeutet. Sie werden

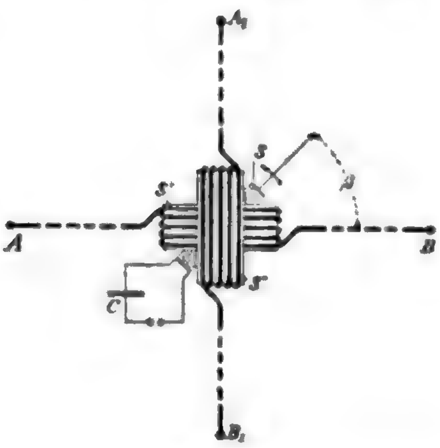


Fig. 107.*

aus einem Kreis C S in der in Figur 107 angedeuteten Weise angeregt. Die Spule S ist drehbar, und es läßt sich leicht einsehen, daß durch ihre Drehung die Anregungsintensität stets so auf die beiden Antennenpaare verteilt wird, daß die ausgezeichnete Achse der Strahlung in die Ebene der Spule S fällt (Radiogoniometer). Nimmt man noch eine mittlere Antenne OD (Fig. 108) hinzu,

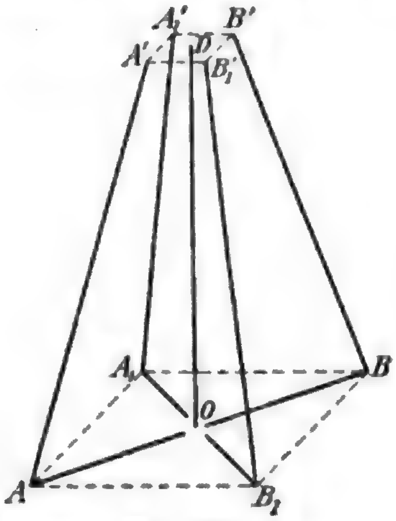


Fig. 108.*

deren Strom mit dem in einer der Eckantennen, z. B. B B' gleichphasig ist, so wird die bilaterale Fernwirkungscharakteristik in eine Charakteristik von der Form Fig. 96 verwandelt und es fällt ein ausgesprochenes Maximum in die Richtung OB, ein ausgesprochenes Minimum in die Richtung OA. Die Anregung der mittleren Antenne erfolgt dadurch, daß sie fest mit der Spule S (Fig. 107) verbunden wird.

Eine Antenne für gerichtete Telegraphie ganz anderer Art stellt die von **Marconi** eingeführte geknickte Antenne dar. Figur 109 zeigt die Anordnung, die sie auf den großen überseeischen Stationen **Marconis** bekommen hat. Eine solche Antenne zeigt entgegen der Richtung des horizontal abgebogenen Teiles eine ausgeprägte Bevorzugung der Strahlung. Die Theorie, die man von dieser Wirkung aufgestellt hat, läßt sich elementar kaum wiedergeben. Sie zeigt, daß die Wirkung nur zustande kommen kann, wenn die Antenne auf schlechtleitendem Boden steht. In

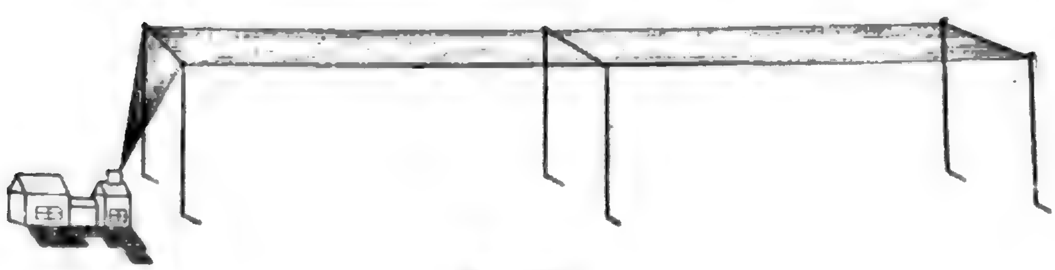


Fig. 109.*

diesem werden dann durch den horizontalen Teil der Antenne Vertikalströme von solcher Phase induziert, daß sie mit der im Vertikalteil der Antenne fließenden Strome interferierend die gerichtete Strahlung liefern.

Fast alle Antennen, die eine Richtwirkung in bezug auf die Aussendung der Wellen ausüben, besitzen auch eine Richtwirkung in bezug auf den Empfang derselben. Die gerichtete Telegraphie hat vor allen Dingen große Bedeutung für die Ortsbestimmung von Schiffen und Flugzeugen. Einige sehr geistreiche Methoden dazu sind ausgearbeitet und erprobt.

II. Die Systeme der drahtlosen Telegraphie.

Bestimmte Kombinationen der in den früheren Abschnitten behandelten Methoden und Apparate zur Ausübung der drahtlosen Telegraphie heißen in der Technik Systeme der drahtlosen Telegraphie. Soweit ein solches System lediglich einer Vereinigung von Patenten in der Hand eines Unternehmers oder einer Unternehmergesellschaft seine Entstehung verdankt, kann es hier nicht Gegenstand der Betrachtung sein. Vielmehr sollen hier als Systeme der drahtlosen Telegraphie solche speziellen Kombinationen besprochen werden, die sich nach prinzipiellen physikalischen Gesichtspunkten unterscheiden lassen. Da stehen zunächst nebeneinander die beiden Systeme der gedämpften und der ungedämpften Schwingungen.

1. Gedämpfte Schwingungen. 1a) Das erste von Marconi eingeführte und recht eigentlich als Marconisches System der drahtlosen Telegraphie zu bezeichnende System verwendet als Sender eine einfache geerdete Antenne, an deren Fußpunkt eine Funkenstrecke eingeschaltet ist. Diese wird von einem Induktor aus betätigt und die Antenne wird durch jeden Funken zu ihren ungeradzahligen Eigenschwingungen angeregt. Als Empfänger dient eine ebensolche Antenne, an deren Fußpunkt direkt oder durch Koppelung eines Hilfskreises indirekt ein Kohärer oder dergleichen mit den nötigen Hilfseinrichtungen zum Zeichenempfang eingeschaltet ist. Die von einer Marconiantenne ausgestrahlten Wellen sind stark gedämpft, da sowohl Strahlungsdekrement, wie vor allem das Funkendekrement groß sind. Eine scharfe Abstimmbarkeit läßt sich mit ihren Wellen nicht erreichen. Der Nutzeffekt der Marconiantennen ist naturgemäß klein, weil der Funken und die neben der Grundschwingung erregten Oberschwingungen viel Energie nutzlos verbrauchen.

1b) Einen erheblichen Fortschritt brachte das Braunsche System der gekoppelten Sender (Fig. 110; vgl. auch Fig. 32): Ein geschlossener Primärkreis von großer Energieaufnahmefähigkeit wird von einer Funkenstrecke F erregt. Eine mit ihm in einer der Abschnitt A, II, 5, d beschriebenen Weisen gekoppelte geerdete Antenne gleicher Schwin-

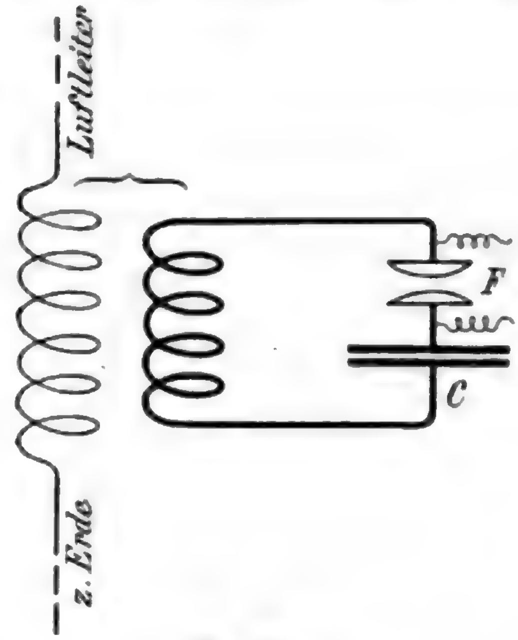


Fig. 110.*

gungszahl übernimmt die Schwingungsenergie nach den ebendort behandelten Prinzipien und strahlt sie aus. Dabei sind zwei Fälle wichtig: bei loser Koppelung schwingt die Antenne wie Figur 26, ihre Amplitude wächst zunächst und klingt dann mit dem Dekrement des Primärkreises ab. Macht man dieses klein, so läßt sich auf diese Art eine schwach gedämpfte Strahlung großer Abstimmungsfähigkeit entsenden. Die Antennenstromstärke kann aber hierbei nicht hoch gesteigert werden. Bei fester Koppelung erhält man, wie Abschnitt A, II, 5, d gezeigt, zwei Schwingungen, von denen die mit kleinerer Schwingungszeit bessere Strahlwirkung entwickelt. Man stimmt im Empfänger auf sie ab, nutzt also nur die Energie dieser Schwingung aus. Die Stromamplitude derselben kann sehr hoch getrieben werden, aber ihre Dämpfung ist auch groß, daher die Abstimmungsfähigkeit der betreffenden Wellen klein. Dieser Fall eignet sich also zur Erzielung großer Reichweite unter Verzicht auf große Abstimmschärfe; der erstgenannte Fall umgekehrt zur Erzielung großer Abstimmschärfe unter Verzicht auf große Reichweite. Der Nutzeffekt ist beim Braunschen Sender wohl stets erheblich größer als beim Marconisender, schon weil die Oberschwingungen nicht mit erregt werden. Freilich ist dieser Sender auch erheblich komplizierter und in der Herstellung teurer. In bezug auf die Isolation bieten die Braunschen Sender

große Vorteile, da bei ihnen die Antenne von der Induktorspannung direkt nicht berührt wird.

Sowohl beim Braunschen wie beim Marconischen Sender ist es zur Steigerung der ausgesandten Energie erwünscht, die Funkenzahl ζ so hoch als möglich zu steigern. Man kommt da aber bald, wie im Artikel „Lichtbogenentladung" B2f ausgeführt ist, an eine Grenze, die man nicht überschreiten darf, ohne daß die Funken inaktiv werden. Es geht dann der Funken in einen Lichtbogenstrom über und es fällt die hohe Zündspannung weg, welche in erster Linie die Quelle für die Entstehung der Schwingung ist. Diese Gefahr ist namentlich groß, wenn man das Betriebsinduktorium mit Wechselstrom erregt. In diesem Falle hat sich außerordentlich bewährt, die Sekundärspule des Induktorium mit der aufzuladenden Kapazität des Primärkreises zusammen zu einem Schwingungssystem auszugestalten, welches mit dem Betriebswechselstrom in Resonanz ist (Resonanzinduktorium; vgl. die Artikel „Transformator" und „Schwingungen. Erzwungene Schwingungen" S. 1140). Dann erfolgt das Aufladen des Kondensators durch den Einschwingungsprozeß des Resonanzinduktors (vgl. Abschn. A II 5d), bis die Funkenspannung erreicht ist, und nun die ganze aufgespeicherte Energie im Primärsystem des Senders in schnelle Oszillationen kommt. Alsbald fängt der Einschwingungsprozeß des Resonanzinduktors von neuem an und alles wiederholt sich. Man erzielt auf diese Art eine überaus wirksame Schwingungserregung.

1c) Eine weitere Stufe der Entwickelung wurde durch das System der Stoßerregung durch Löschfunken von M. Wien erreicht, dessen technische Ausgestaltung die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie übernahm. Das Prinzip ist Abschnitt B I 4 erörtert. Da hier nach Beendigung der Stoßwirkung lediglich die Antenne schwingt, so hat man sowohl scharf definierte Schwingungszahl, als kleine Dämpfung, d. h. die Möglichkeit sehr scharfer Abstimmung. Der Nutzeffekt ist, wie schon früher hervorgehoben, recht groß, bis 85%. Wegen der besonderen, die Löschwirkung begünstigenden Einrichtungen der Funkenstrecken läßt sich bei diesem System die Funkenzahl auf sehr hohe Beträge bringen, ohne daß Lichtbogenbildung eintritt. Die dadurch erreichte Vergrößerung der ausgestrahlten Energie übertrifft sogar die Verringerung, die dadurch entsteht, daß man im allgemeinen, wegen der sehr kurzen Funkenstrecken, wesentlich kleinere Stromamplituden benutzen muß, als bei dem Braunschen und Marconischen Sender. Damit werden zugleich auch wieder die Isolationsschwierigkeiten weiter herabgesetzt; so wird hier auch das Sprühen der Kondensatoren völlig vermieden.

1d) Erregt man die gedämpften Wellen mit Hilfe einer Wechselspannung genügend hoher Frequenz, so, daß in jeder Halbperiode wenigstens einige Entladungen erfolgen, so flutet die ausgestrahlte Energie, wie Abschnitt B I 2 gezeigt, mit der doppelten Wechselstromperiode auf und ab. In einem mit Telephonhörer als Meßinstrument ausgestatteten Empfänger werden die Wellen dann als Ton der entsprechenden Tonhöhe wahrgenommen. (Tönende Funken. Vgl. Abschnitt C II 1 b β). Dieses zuerst von Blondel angegebene Prinzip ist in Kombination mit der Wienschen Stoßerregungsmethode zu dem System der tönenden Löschfunken ausgebildet (Gesellschaft für drahtlose Telegraphie). Die erregenden Wechselspannungen werden entweder durch Wechselstrommaschinen erzeugt oder bei anderen Systemen durch den selbsttönenden Lichtbogen nach Duddell (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung", Abschnitt B 2 f). Im letzteren Falle ist ein schneller Wechsel der Tonhöhe und eine Zeichengebung durch ganze Tonsignale möglich. Diese Methode gestattet natürlich auch neben der elektrischen Resonanz der Stationen eine akustische Resonanz zu verwerten, wodurch die Störung durch Wellen anderer Stationen selbst dann vermieden werden kann, wenn sie dieselbe elektrische Schwingungszahl haben, wie die der Verkehrsstation. Auch lassen sich an derselben Station die Zeichen mehrerer Senderstationen gleichzeitig empfangen, wenn sie mit verschiedenen Tönen, wenn auch gleicher elektrischer Schwingungszahl arbeiten.

2. Ungedämpfte Schwingungen. Das Problem ungedämpfte Hochfrequenzschwingungen zu erregen, gelang zuerst nach der Lichtbogenmethode (vgl. Abschnitt B II 2) dem Dänen W. Poulsen, der das nach ihm benannte System der drahtlosen Telegraphie daraus entwickelte. Sein Empfänger ist durch die Abschnitt C II 1 b γ behandelte Tikkerschaltung charakterisiert. Die Vorzüge der ungedämpften Schwingungen bestehen in dem ergiebigen Energietransport und in der scharfen Abstimmfähigkeit. Die letztere wird bei der Lichtbogenmethode zum großen Teil dadurch illusorisch, daß die Schwingungszahl stark von den Schwankungen des Lichtbogenzustandes abhängt. Ueber die Hochfrequenzmaschinen, die man in neuerer Zeit zur direkten Erregung ungedämpfter Schwingungen konstruiert hat, ist Abschnitt B II 1 berichtet. Heute darf man sagen, daß für die drahtlose Telegraphie das System der ungedämpften Schwingungen kaum einen Vorteil vor dem System der Stoßerregung hat, der nicht vorerst noch durch

die größere Kompliziertheit der Apparatur aufgewogen würde. Dementsprechend geht auch die Entwickelung zurzeit stark in der Richtung des Stoßerregungssystems. Für die Durchführung der drahtlosen Telephonie allerdings ist das System der ungedämpften Schwingungen einstweilen vor dem der gedämpften weitaus im Vorsprung.

III. Der Entwickelungsstand der drahtlosen Telegraphie.

Der Stand der heutigen Entwickelung ist dadurch charakterisiert, daß ein drahtloser Verkehr über 4000 bis 6000 km mit ziemlicher Sicherheit möglich ist, wenn man genügend hohe Antennen verwenden kann. Daß demnach ein dauernder drahtloser Verkehr zwischen England und Amerika von Marconi unterhalten wird; daß ein direkter Verkehr zwischen Deutschland und seinen afrikanischen Kolonien eingeleitet ist; daß ein Schiff auf dem atlantischen Ozean dauernd mit dem Lande in drahtloser Verbindung bleibt; daß die Poststation Norddeich die Schiffe des Atlantischen Ozeans jeden Tag mit den neuesten Nachrichten telegraphisch versorgt; daß die Großstationen Norddeich und Eiffelturm jeden Tag die genaue astronomische Zeit durch telegraphische Zeitsignale verbreiten u. a. m. Auch mag die Angabe von Interesse sein, daß z. B. die deutsche Gesellschaft für drahtlose Telegraphie ohne die geheim gehaltenen Armee- und Marinestationen bis heute 392 Landstationen auf der ganzen Erde errichtet und 946 Schiffstationen geliefert hat. Eine Abstimmschärfe von $\frac{1}{2}\%$ läßt sich ohne große Mühe sicherstellen, so daß auch die Frage der Störungsfreiheit gelöst ist.

IV. Drahtlose Telephonie.

Man hat schon bald nach den ersten Erfolgen der drahtlosen Telegraphie angefangen, dem Problem einer drahtlosen Telephonie Aufmerksamkeit zu schenken (Fessenden, Simon, Majorana u. a.). Und zwar versuchte man zuerst mit gedämpften Wellen zum Ziel zu kommen. Es kommt, um mit Hilfe elektrischer Wellen telephonische Zeichen zu übertragen, offenbar darauf an, die Energie der entsandten Wellen so auf- und abfluten zu lassen, wie die Schallwellen des gesprochenen Wortes auf- und abfluten. Man hat also nur einen Schritt weiter zu gehen, als man mit dem Prinzip der tönenden Funken gegangen ist und gewissermaßen sprechende Funken zu verwenden. Dazu ist im Falle gedämpfter Schwingungen eine Entladungszahl nötig, die vielmal größer ist, als die Frequenz der zu übertragenden Schallschwingungen. Wo sie erreichbar ist, läßt sich, analog dem Prinzip der tönenden Funken (vgl. Abschn. B, I, 2) die Entladungszahl und damit die Energie der entsandten Wellen, im Rhythmus der Schallschwingungen variieren. Z. B. dadurch, daß die Funkenlänge durch eine schwingende Membrane variiert wird. Sehr viel vollkommener war das Ziel zu erreichen, sobald man gelernt hatte, ungedämpfte Schwingungen zu erzeugen. So will Fessenden mit seiner Hochfrequenzmaschine (vgl. Abschn. B, II, 1) schon 1904 eine sichere telephonische Verständigung auf 25 englische Meilen erreicht haben; Poulsen ist mit der Lichtbogenmethode der ungedämpften Schwingungen bis auf 500 km gekommen; neuerdings ist mit der Hochfrequenzmaschine der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie von Nauen aus eine Entfernung von 700 km telephonisch überbrückt worden.

Die Beeinflussung der Strahlungsenergie durch die Schallschwingungen kann auf verschiedene leicht ersichtliche Arten geschehen. Am einfachsten und gebräuchlichsten ist es, so wie in Figur 111 angedeutet,

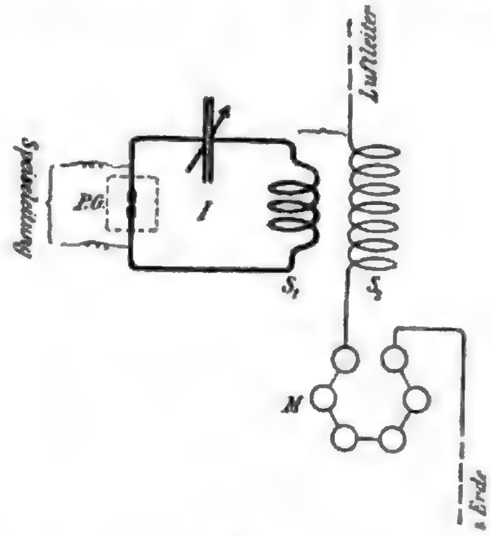


Fig. 111.*

das oder die Mikrophone M direkt in die Antenne einzuschalten. Durch die Widerstandsschwankungen des Mikrophons wird dann die Stromstärke der Antenne, entsprechend der Gleichung

$$J = \frac{E}{\mathfrak{R} + \mathfrak{R}_S} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 99)$$

(vgl. Gl. 42) in analoge Schwankungen versetzt. Die Strahlung ist ja aber nach Gl. 81a) dem Quadrate der Stromstärke proportional. Gleichung 99 zeigt, daß es am günstigsten ist, den Mikrophonen einen Widerstand zu geben, der dem Strahlungswiderstande gerade gleich ist, vorausgesetzt, daß der übrige Antennenwiderstand verschwindend ist. Man kann

die Mikrophone auch in den Kreis I legen und hat ihnen dann einen Widerstand zu geben, der, auf die Antenne unter Berücksichtigung der Koppelung umgerechnet, wieder dem Strahlungswiderstand gleich wird. (Vgl. A, II, 5, d, *aa*.) Bei dieser Schaltung hat man es durch Variation der Koppelung in der Hand, ein gegebenes Mikrophon in der für eine gegebene Antenne wirksamsten Weise zu benutzen.

Der schwierigste Teil dieser Anordnungen ist stets das Mikrophon. Es muß mit so starken Strömen beansprucht werden, daß es leicht zerstört wird. Eine Reihe besonderer Mikrophonkonstruktionen ist besonders für den Zweck der drahtlosen Telephonie ausgedacht worden. Am wirksamsten scheint das Flüssigkeitsmikrophon von Mojorana zu sein (Fig. 112): ein Flüssig-

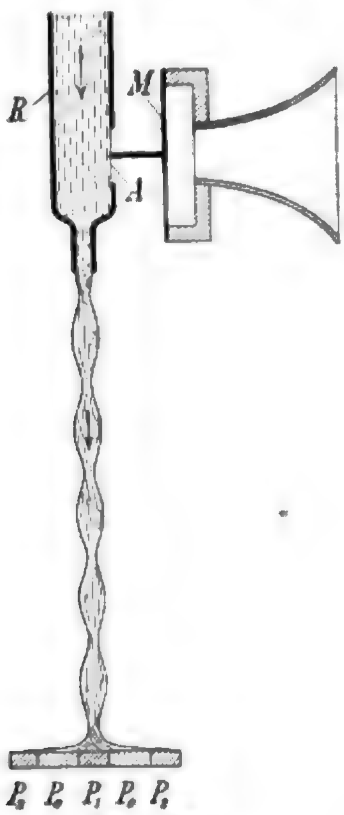


Fig. 112.*

keitsstrahl fällt auf einen Kontaktapparat, so daß die Flüssigkeitslamelle zwischen P_1 und dem Ringe P_2P_3 leitende Verbindung herstellt. Wird der Strahl durch die Membranschwingungen erschüttert, so bilden sich entsprechende Einschnürungen an ihm, und die Dicke der leitenden Lamelle schwankt entsprechend auf und ab. — Eine Empfangsschaltung für drahtlose Telephonie ist Figur 113 abgebildet. Es ist notwendig, die Dämpfung des Empfangssystems groß zu machen, weil sonst die Einschwingungsvorgänge (vgl. A, II, 5, d) zu stark hervortreten und die Sprache verzerren. Th ist ein Thermodetektor oder Kristalldetektor oder glühelektrischer Detektor (vgl. C, II, 1), welche sich am besten eignen.

V. Medizinische Anwendungen der elektrischen Schwingungen.

Die elektrischen Schwingungen sind in zweierlei Weise zu therapeutischen Zwecken herangezogen worden.

1) d'Arsonval setzt die Patienten einem schwingenden elektromagnetischen Felde aus, indem er sie in das Innere großer, in elektrische Schwingungen versetzter Spulen bringt. Ob dabei mehr als suggestive Wirkungen erzielt werden, steht dahin.

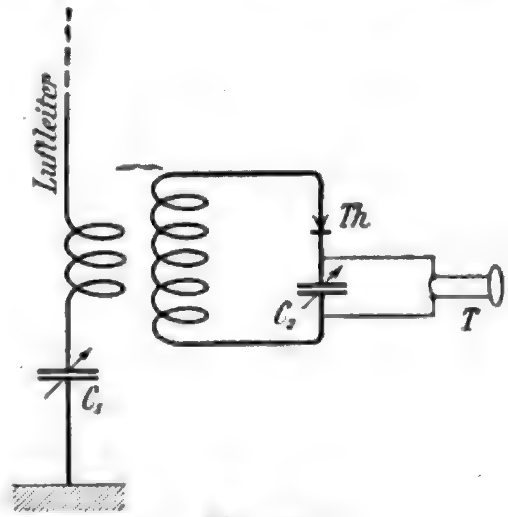


Fig. 113.*

2. Elektropenetration. Die starken Hochfrequenzströme, die man mit der Lichtbogenmethode erzielt, üben in benachbarten Leitern eine beträchtliche Induktions- und damit Heizwirkung aus. Das benutzt man, um rheumatisch kranke Körperstellen zu behandeln, indem man von Hochfrequenzströmen durchflutete Spulen auf die betreffenden Stellen auflegt. Ob außer der Wärmewirkung auch noch spezifisch elektrische Wirkungen dabei auf das Gewebe ausgeübt werden, ist unentschieden.

Literatur. *In den beiden umfassenden Werken* **J. Zenneck,** *Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie. Stuttgart 1905 und* **Derselbe,** *Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie. II. Aufl. Stuttgart 1913 finden sich die wichtigsten von den zahllosen Werken und Einzelarbeiten des Gebietes zitiert. Ferner sei auf das „Jahrbuch der drahtlosen Telegraphie" hingewiesen (Leipzig), welches seit 1907 ziemlich die ganze Literatur in Originalmitteilungen und Referaten vereinigt.*

H. Th. Simon.

Schwingungen.

Erzwungene Schwingungen.

I. Mechanische Schwingungen von Punkten und Punktsystemen. A. Erzwungene Schwingungen eines Systems von einem Freiheitsgrad mit sinusförmiger Eigenschwingung. 1. Schwingungsgleichung und Schwingungsform bei ungedämpfter sinusförmiger Erregung. 2. Phasenverschiebung, Resonanz und Resonanzkurven. 3. Schwingung bei komplizierter Form der erregenden Kraft. Selektivvermögen des Resonators. 4. Schwingung bei gedämpfter sinusförmiger Erregung. 5. Bestimmung der Frequenz und der Dämpfung aus der Resonanzkurve. B. Systeme mit nicht-sinusförmiger Eigenschwingung. 6. Schwingungsgleichung bei nicht-sinusförmiger Eigenschwingung. 7. Kombinationsschwingungen und -töne.

II. Systeme mit mehreren Freiheitsgraden. Gekoppelte Systeme. 8. Energie und Bewegungsgleichungen der Punktsysteme. 9. Aus zwei Teilsystemen gekoppeltes System, von denen eins durch eine sinusförmige Kraft erregt wird. 10. Phasenverschiebung und Energieverteilung zwischen den Teilsystemen. 11. Dämpfung durch erzwungene Schwingung. Koppelung mit einem isochronen System. Schlingertank.

III. Elektromagnetische Schwingungen. 12. Energie und Schwingungsgleichungen elektromagnetischer Systeme im allgemeinen. 13. Erzwungene Schwingungen eines Leiters mit hintereinander geschalteter Selbstinduktion und Kapazität.

IV. Erzwungene Schwingungen elastischer Körper. 14. Allgemeines. Bedeutung der erzwungenen Schwingungen für den dynamischen Ausbau der Festigkeitslehre und Kinematik. 15. Transversalschwingungen der beiderseits befestigten Saite, von der ein Punkt einer periodischen Kraft unterliegt. 16. Verallgemeinerung und Uebertragung der Ergebnisse von der Saite auf andere Körper (Stäbe, Platten usw.). 17. Schwingungsfiguren. Wandern der Knoten bei Aenderung der Erregungsfrequenz. Erzwungene Schwingungen mit halber und doppelter Frequenz der Erregung.

V. Anwendungen, insbesondere der Resonanz. 18. Resonanz gasförmiger Körper. Zylinder- und Kugelresonatoren. 19. Anwendungen. Resonanz bei Musikinstrumenten usw. Frahmscher Frequenzmesser. Frequenzmessung in der drahtlosen Telegraphie. 20. Weitere Anwendungen. Verstärkung der Wirkung bei Senderantennen. Resonanztransformator. Vibrationsgalvanometer. Optisches Telephon.

VI. Erzwungene Schwingungen in der Optik. 21. Die gebundenen Elektronen als Resonatoren. Absorption und Dispersion des Lichtes. Inverser Zeemaneffekt. 22. Fluoreszenz. Woodsche Resonanzspektren des Natriumdampfes usw.

Wird ein schwingungsfähiges Gebilde irgendwelcher Art — kurz Schwingungssystem genannt — äußeren Einwirkungen (Kräften) unterworfen, deren Stärke periodisch schwankt, so schwingt es im Rhythmus dieser äußeren Kräfte mit; man bezeichnet diese, unter dem Zwange der äußeren oder eingeprägten Kräfte erfolgenden Schwingungen als **erzwungene Schwingungen** im Gegensatz zu den freien oder natürlichen oder Eigenschwingungen, welche das System ohne diesen Zwang, sich selbst überlassen, nur unter der Wirkung seiner inneren Kräfte ausführt (vgl. die Artikel **Schwingende Bewegung** und **Schwingende Systeme**).

Der Vorgang des Mitschwingens wird auch als **Resonanz** bezeichnet; doch wird dieser Name besonders zur Bezeichnung des maximalen Mitschwingens benutzt, das unter bestimmten Umständen eintritt (vgl. weiter unten).

Der Verlauf der erzwungenen Schwingungen, ihre Form und Stärke (Intensität) hängt von Form und Stärke der äußeren periodischen Kraft oder erregenden Schwingung und von der Natur des erregten (resonierenden) Systems ab. Bei räumlich ausgedehnten Systemen kommt auch die Lage des Angriffspunktes der Kraft in Betracht.

Die Natur eines Schwingungssystems prägt sich in seinen Eigenschwingungen aus. Deren charakteristische Bestimmungsstücke, nämlich **Eigenschwingungszahl** (**Eigenfrequenz** bezw. -frequenzen, wenn mehrere Partialschwingungen möglich sind), **Dämpfung** und die **Form** der möglichen Eigenschwingungen bestimmen daher wesentlich mit die Form und den Verlauf der erzwungenen Schwingungen. Unter Schwingungsform ist hier sowohl die Form der zeitlichen Schwingungskurve (Elongation als Funktion der Zeit), als auch — bei ausgedehnten Systemen — die räumliche Schwingungsverteilung (Elongation als Funktion des Ortes, Klangfiguren bei mechanischen Systemen) zu verstehen. Wo beides unterschieden werden soll, wird ersteres als Schwingungsform, letzteres als Schwingungsfigur bezeichnet werden. Z. B. hängt die Stärke des Mitschwingens einer Saite, einer Luftsäule, einer Membran usw. außer von der Stärke der erregenden Kraft noch ab von dem Verhältnis der Eigenfrequenz dieser Gebilde zur Frequenz der erregenden Schwingung, von der Stärke der Eigendämpfung und von der Lage des Angriffspunktes der Kraft relativ zu den Knotenflächen, -linien oder -punkten der Eigenschwingungen dieser Systeme. Ganz entsprechendes gilt für elektromagnetische Schwingungen, z. B. bei den Sendern der drahtlosen Telegraphie, wo die Lage der Stelle, an welcher eine Senderantenne durch den Primärkreis erregt wird, von bedeutendem Einfluß auf die Ausbildung der Schwingungen in ihr ist. Auch Eigenfrequenz und Dämpfung spielen genau dieselbe Rolle, wie bei mechanischen Systemen. Ueberhaupt gelten für mechanische und elektromagnetische Schwingungen formal vielfach dieselben Beziehungen, und gewisse Gesetze lassen sich ganz allgemein für beide

aufstellen. Eine besondere Klasse der elektromagnetischen Schwingungen bilden die optischen, die auch besonders behandelt werden sollen.

I. Mechanische Schwingungen von Punkten und Punktsystemen.

A. Erzwungene Schwingungen eines Systems von einem Freiheitsgrad mit sinusförmiger Eigenschwingung.

1. Schwingungsgleichung und Schwingungsform bei ungedämpfter sinusförmiger Erregung. Ein System von einem Freiheitsgrade der Bewegung, d. h. ein System, dessen Konfiguration in jedem Augenblick durch eine einzige, von der Zeit abhängige Variable bestimmt ist, und das, sich selbst überlassen, Eigenschwingungen von gewisser, durch seine Natur bedingter Frequenz ausführt, gibt erzwungene Schwingungen einfachster Art. Typisch ist der Fall eines derartigen Systems, dessen Eigenschwingungen exponentiell gedämpfte sinusförmige Schwingungen sind von der Form

$$(1) \qquad x = \mathfrak{A} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \vartheta)$$

Hier bedeutet x die jeweilige Elongation aus der Ruhelage, ω die Kreisfrequenz oder zyklische Schwingungszahl (Zahl der Schwingungen in der Zeit $2\pi = 6{,}2832$ Sekunden) $= \frac{2\pi}{T}$, wenn T die Schwingungsdauer (Periode) ist; ϑ ist eine Phasenkonstante, $\mathfrak{A}$ die Amplitudenkonstante (Amplitude zur Zeit t = o) und δ die Dämpfungskonstante oder Dämpfung schlechthin, die mit dem natürlichen logarithmischen Dekrement $\mathfrak{d}$ der ganzen Schwingung verbunden ist durch die Beziehung

$$(2) \qquad \mathfrak{d} = \delta T = \frac{2\pi\delta}{\omega}$$

Ein solches System ist z. B. ein Massenpunkt, der sich nur längs einer festen Geraden (der x-Achse) bewegen kann, und auf dieser einen bestimmten Punkt (x = o) als Gleichgewichts- oder Ruhelage besitzt, nach der er mit einer der Ablenkung x proportionalen Kraft $-Dx$ zurückgetrieben wird, wenn er sich daraus entfernt. Die in der Entfernung x = 1 auf ihn wirkende Kraft, die Direktionskraft D, ist in diesem Fall konstant. Außer der rücktreibenden Kraft $-Dx$ wirkt auf ihn noch die hemmende, der jeweiligen Geschwindigkeit $u = \frac{dx}{dt}$ proportionale dissipative, d. h. energiezerstreuende Kraft $-R\frac{dx}{dt}$. Ist M die Masse des Punktes, so ist die Differentialgleichung seiner Bewegung ohne Wirkung äußerer Kräfte, also die Differentialgleichung seiner Eigenschwingungen (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegung")

$$(3) \qquad M\frac{d^2x}{dt^2} = -Dx - R\frac{dx}{dt}$$

Setzt man

$$(4) \qquad \frac{R}{M} = 2\delta, \quad \frac{D}{M} = \omega_0^2, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

so ist (1) das allgemeine Integral der Gleichung (3) für den Fall, daß $\omega_0 > \delta$ ist. Anderenfalls ergeben sich Exponentialausdrücke, welche aperiodisch gedämpfte, sehr schnell erlöschende Bewegungen darstellen, die hier nicht interessieren.

Fügt man zu der rücktreibenden und der hemmenden Kraft auf der rechten Seite von (3) noch eine periodische, nur von t, nicht auch von der Lage x des Punktes abhängende Kraft S(t) hinzu, so erhält man die Differentialgleichung der erzwungenen Schwingung

$$(5) \qquad M\frac{d^2x}{dt^2} = -Dx - R\frac{dx}{dt} + S(t).$$

Sie ist einfach lösbar, wenn die eingeprägte Kraft oder „Störungsfunktion" S(t) selbst eine sinusförmige Schwingung ist. Der sich dabei ergebende einfachste Fall der Bewegungsgleichung (5)

$$(6) \qquad M\frac{d^2x}{dt^2} + R\frac{dx}{dt} + Dx = A' \sin \nu t$$

oder nach Division mit M

$$(6\text{a}) \qquad \frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta\frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = A \sin \nu t$$

hat die allgemeine Lösung

$$(7) \qquad x = a \sin(\nu t - \Theta) + \mathfrak{A} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \vartheta)$$

wo

$$(8) \qquad \left\{ \begin{aligned} a &= \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \nu^2)^2 + 4\nu^2\delta^2}}, \\ \operatorname{tg}\Theta &= \frac{2\nu\delta}{\omega_0^2 - \nu^2} \\ \sin\Theta &= \frac{2\nu\delta}{\sqrt{(\omega_0^2 - \nu^2)^2 + 4\nu^2\delta^2}}, \\ \cos\Theta &= \frac{\omega_0^2 - \nu^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \nu^2)^2 + 4\nu^2\delta^2}}, \end{aligned} \right.$$

Hier ist ν die (Kreis-) Frequenz der erregenden ungedämpften Schwingungen, A die Amplitude der Erregung, Θ eine Phasenkonstante, für welche der kleinste, aus den Gleichungen (8) sich ergebende Winkel zu setzen ist.

Die resultierende Bewegung setzt sich, wie aus (7) folgt, zusammen aus der erzwungenen Schwingung $a \sin(\nu t - \Theta)$ mit der Periode der erregenden Kraft und der Eigenschwingung $\mathfrak{A} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \vartheta)$ mit der Eigenperiode ω des resonierenden Systems.

Da die letztere gedämpft ist, so erlischt sie nach einiger Zeit gegenüber der (ungedämpften) erzwungenen Schwingung, die dauernd in gleicher Stärke fortbesteht.

Wenn die Dämpfung δ des resonierenden Systems so stark ist, daß es überhaupt keiner Eigenschwingungen, sondern nur einer stark gedämpften, aperiodischen Eigenbewegung fähig ist, so tritt in (7) statt des Gliedes $\mathfrak{A}e^{-\delta t}\sin(\omega t + \vartheta)$ ein Glied, welches diese Bewegung darstellt, als Zusatz zu der erzwungenen Schwingungsbewegung auf. In jedem Falle aber werden diese gedämpften Zusatzglieder nach einer gewissen Zeit praktisch unmerklich klein und können dann vernachlässigt werden. Von diesem Augenblick an ist die Bewegung des resonierenden Systems eine einfach sinusförmige Schwingung mit der Frequenz ν der erregenden Kraft. Solange die Eigenbewegung noch merklich ist, finden, wenn dieselbe eine Schwingung ist, Schwebungen zwischen ihr und der erzwungenen Schwingung statt, falls nicht gerade die Frequenz ν mit ω genau übereinstimmt. Diese Schwebungen kann man z. B. wahrnehmen, wenn man ein mäßig gedämpftes System (Glocke, Stahllamelle usw.) durch elektrischen Wechselstrom von geeigneter Frequenz in Schwingung versetzt und in den Stromkreis ein Hörtelephon einschaltet. Eine kurze Zeitlang nach dem Einschalten des Stromes hört man die Schwebungen.

2. Phasenverschiebung, Resonanz und Resonanzkurven. Die erzwungene Schwingung hat eine Phasendifferenz gegen die erregende Kraft. Die Phasenverzögerung — um eine solche handelt es sich hier — ist Null, wenn ν sehr klein ist gegen ω_0, d. h. wenn die erregende Schwingung viel langsamer ist als die Eigenschwingung; sie ist 180° oder π, d. h. die erzwungene Schwingung ist um eine halbe Schwingungsperiode im Rückstand, wenn ν sehr groß ist gegen ω_0, wenn also die erregende Schwingung viel schneller ist als die Eigenschwingung; sie ist gleich 90° oder $\frac{\pi}{2}$, d. h. die erzwungene Schwingung ist um eine Viertelperiode im Rückstand, wenn $\nu = \omega_0$ ist, wenn also die erregende Schwingung dieselbe Frequenz hat, wie die Eigenschwingung ohne Dämpfung sie haben würde (Resonanzfall).

Der Anstieg der Phasendifferenz von 0° auf 180° erfolgt bei starker Dämpfung (großem δ) langsam und gleichmäßig mit wachsendem ν, bei schwacher Dämpfung (kleinem δ) dagegen schnell und plötzlich in der nächsten Umgebung der Resonanzstelle $\nu = \omega_0$. In Figur 1 ist die Phasenverzögerung Θ als Funktion der Verstimmung $\frac{\nu}{\omega_0}$ in der Nähe der Resonanzstelle $\frac{\nu}{\omega_0} = 1$ für drei Systeme mit den natürlichen logarithmischen Dekrementen $\mathfrak{d} = 0{,}0461$ (Kurve I), $\mathfrak{d} = 0{,}1151$ (Kurve II) und $\mathfrak{d} = 0{,}2303$ (Kurve III) dargestellt. Es sind dies dieselben Dämpfungen, welche auch für die Resonanzkurven Figur 3 gelten. Kurve I entspricht der schwächsten, III der stärksten Dämpfung.

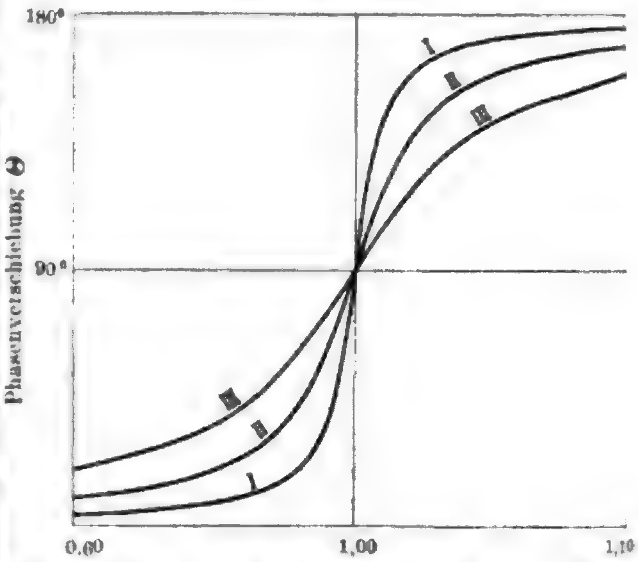


Fig. 1. Gang der Phasendifferenz Θ. Abszissen: Frequenzverhältnis (Verstimmung) $\frac{\nu}{\omega_0}$. Ordinaten: Phasendifferenz Θ in Bogengraden.

Der Fall $\nu = \omega_0$ ist einer der möglichen Resonanzfälle, d. h. einer derjenigen Fälle, in denen stärkstes Mitschwingen erfolgt. Wie aus Gleichung (8) hervorgeht, hängt die Amplitude a der erzwungenen Schwingung von dem Größenverhältnis, oder, in musikalischer Bezeichnung, dem Intervall $\frac{\nu}{\omega_0}$ zwischen ν und ω_0 ab und variiert mit ν. Sie wird offenbar ein Maximum, wenn $\nu = \omega_0$ wird. Vorausgesetzt ist dabei, daß bei der Variation der Erregungsfrequenz ν die Amplitude A der erregenden Schwingung konstant gehalten wird. Trägt man die Frequenz ν der Erregung als Abszissen, die zugehörigen Amplituden a der erregten Schwingung als Ordinaten auf, so erhält man die Resonanzkurve der Schwingungsamplitude a für den Fall konstanter Erregeramplitude A. Entsprechende Resonanzkurven erhält man für die Intensität (Energie) J der Schwingung, die (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegung") mit der Amplitude a und Frequenz ν der Schwingung zusammenhängt nach der Gleichung

$$J = \frac{1}{2} M \nu^2 a^2. \tag{9}$$

Durch Einsetzen von a aus Gleichung (8) erhält man hierfür

$$\text{(9a)}\quad \bar{J} = \frac{M}{2}\,\frac{A^2\nu^2}{(\omega_0^2-\nu^2)^2+4\nu^2\delta^2}$$

Man hat insbesondere vier Fälle von Resonanzkurven zu unterscheiden

1. Resonanzkurve der Amplitude $\bar{a}$ } bei konstanter Erregungsamplitude A.
2. " " Intensität $\bar{J}$ } bei konstanter Erregungsamplitude A.
3. " " Amplitude a } bei konstanter Erregungsintensität.
4. " " Intensität J } bei konstanter Erregungsintensität.

Die Erregungsintensität ist proportional $\nu^2 A^2$; dieser Ausdruck ist also in den Fällen 3 und 4 konstant zu halten. Die Formen dieser vier Kurven sind etwas verschieden; vor allem ist die Lage des Maximums, d. h. die Resonanzfrequenz nicht bei allen dieselbe. Durch Anwendung der bekannten Rechnungsregeln für die Auffindung der Maxima und Minima von Kurven erhält man folgendes:

Fall 1. A konstant: Resonanzfrequenz

$$\nu_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$$

Resonanzamplitude

$$\bar{a}_r = \frac{A}{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} = \frac{A}{2\delta\omega}.$$

Für $\nu = 0$ ist $\bar{a} = \frac{A}{\omega_0^2} = \frac{A}{\omega^2+\delta^2}$, für $\nu = \infty$ ist $\bar{a} = 0$.

Fall 2. A konstant: Resonanzfrequenz

$$\nu_r = \omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \delta^2}$$

Resonanzintensität

$$\bar{J}_r = \frac{M}{2}\cdot\frac{A^2}{4\delta^2}.$$

Für $\nu = 0$ ist $\bar{J} = 0$, für $\nu = \infty$ ist $J = 0$.

Fall 3. νA konstant. Hier ist keine eigentliche Resonanzkurve vorhanden, denn für $\nu = 0$ ist die Amplitude $a = \infty$ und fällt von da stetig auf den Wert 0, der für $\nu = \infty$ erreicht wird.

Fall 4. νA konstant: Resonanzfrequenz

$$\nu_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$$

Resonanzintensität

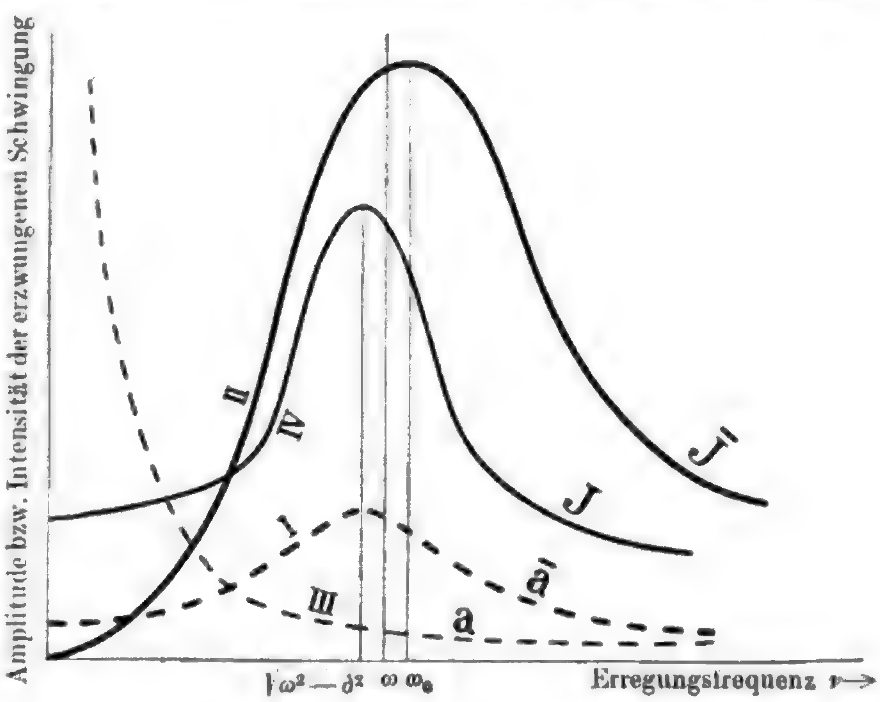
$$J_r = \frac{M}{2}\,\frac{\nu^2A^2}{4\delta^2(\omega_0^2-\delta^2)} = \frac{M(\nu^2A^2)}{8\delta^2\omega^2}$$

Für $\nu = 0$ ist $J = \frac{M(\nu^2A^2)}{2\omega_0^4}$

für $\nu = \infty$ ist $J = 0$.

Diese 4 Fälle sind in Figur 2 durch die 4 Kurven a, $\bar{a}$, J, $\bar{J}$ dargestellt. Der Punkt maximalen Mitschwingens, der Resonanzpunkt, liegt in keinem Falle bei der Frequenz ω der gedämpften Eigenschwingungen, sondern teils darüber, teils darunter. Die Abweichungen sind jedoch bei nicht extrem starker Dämpfung δ meist zu vernachlässigen. Beispielsweise ist selbst bei dem großen Werte $\mathfrak{d} = 0{,}23$ des logarithmischen Dekrementes, bei welchem schon nach 10 Schwingungen die Amplitude der Eigen-

Fig. 2. Resonanzkurven der Amplitude und Intensität. Abszissen: Erregungsfrequenz ν. Ordinaten: I — — — Amplitude $\bar{a}$ der erzwungenen Schwingung bei konstanter Amplitude der Erregung. II ——— Intensität J der erzwungenen Schwingung bei konstanter Amplitude der Erregung. III — — — Amplitude a der erzwungenen Schwingung bei konstanter Intensität der Erregung. IV ——— Intensität J der erzwungenen Schwingung bei konstanter Intensität der Erregung.



schwingungen auf den zehnten Teil herabsinkt, nach Gleichung (2) $\frac{\delta}{\omega}$ nur erst $\frac{0{,}23}{2\pi} = 0{,}037$. Also wird selbst in diesem Falle die relative Verschiebung der Resonanzpunkte verschwindend klein, da

$$\frac{\omega_0 - \omega}{\omega} = \frac{\sqrt{\omega^2 + \delta^2} - \omega}{\omega}$$

$$= \sqrt{1 + \frac{\delta^2}{\omega^2}} - 1 = \frac{1}{2}\,\frac{\delta^2}{\omega^2} = 0{,}00067$$

ist mit erlaubter Vernachlässigung höherer Glieder der Reihenentwickelung nach dem binomischen Lehrsatz. Die Verschiebung beträgt also noch nicht ein Tausendstel der Eigenfrequenz ω. Für die Verschiebung nach der anderen Seite ergibt sich derselbe Wert. Die drei Frequenzen $\sqrt{\omega^2 - \delta^2}$, ω und $\sqrt{\omega^2 + \delta^2}$ oder ω_0 fallen also praktisch in den meisten Fällen zusammen.

Hat die Dämpfung des resonierenden Systems auf die Lage der Resonanzstelle somit nur geringen Einfluß, so wirkt sie sehr stark auf die absolute Intensität des Mitschwingens, insbesondere auf die absolute Größe der Resonanzamplitude bezw. -intensität ein. In der graphischen Darstellung spricht sich dieser Einfluß in der veränderten Form der Resonanzkurve aus; bei starker Dämpfung (großem δ) verläuft sie flach mit einem niedrigen breiten Maximum, bei schwacher Dämpfung (kleinem δ) hat sie an der Resonanzstelle ein hohes spitzes Maximum. Außerdem sind die Absolutwerte aller Ordinaten größer als bei starker Dämpfung. Für drei verschiedene Dämpfungen mit den logarithmischen Dekrementen $\mathfrak{d} = 0{,}046$, $\mathfrak{d} = 0{,}115$ und $\mathfrak{d} = 0{,}230$ enthält Tabelle 1 die Werte der Intensität $\bar{J}$ für den Fall 2, bei welchem die Erregungsamplitude A konstant gehalten wird. $\bar{J}$ läßt sich hier in folgende Form bringen:

Tabelle 1.

Stärke des Mitschwingens für verschiedene Dämpfungen bei variabler Frequenz und konstanter Amplitude der erregenden Schwingung.

Intervall $\frac{\nu}{\omega_0}$ zwischen erregender Schwingung ν und ungedämpfter Eigenschwingung ω_0	Die Amplitude $\mathfrak{A}e^{-\delta t}$ der gedämpften Eigenschwingung ω des resonierenden Systems sinkt auf $^1/_{10}$ nach s = 50 Schwingungen	s = 20 Schwingungen	s = 10 Schwingungen
$\frac{\nu}{\omega_0}$	$\bar{J}$	$\bar{J}$	$\bar{J}$
Einklang $\frac{80}{80}$	100	16,00	4,00
$\frac{81}{80}$ und $\frac{80}{81}$	25,82	10,96	3,59
$\frac{82}{80}$ " $\frac{80}{82}$	8,09	5,68	2,75
$\frac{83}{80}$ " $\frac{80}{83}$	3,81	3,17	1,99
$\frac{84}{80}$ " $\frac{80}{84}$	2,20	1,98	1,44
$\frac{85}{80}$ " $\frac{80}{85}$	1,44	1,34	1,07
$\frac{86}{80}$ " $\frac{80}{86}$	1,01	0,96	0,82
$\frac{87}{80}$ " $\frac{80}{87}$	0,76	0,71	0,64
$\frac{88}{80}$ " $\frac{80}{88}$	0,59	0,57	0,51
$\frac{89}{80}$ " $\frac{80}{89}$	0,47	0,46	0,42
Gr. Ganzton $\frac{90}{80}$ " $\frac{80}{90}$	0,38	0,38	0,35
natürl. log. Dekrement $\mathfrak{d}$	0,04605	0,1151	0,2303

$$(10)\quad J = \frac{MA^2}{2\left[\omega_0^2\left(\frac{\omega_0}{\nu}-\frac{\nu}{\omega_0}\right)^2+4\,\delta^2\right]}$$

Die zugehörige Figur 3 zeigt den Verlauf der Resonanzkurven. Für die anderen Fälle ist das Bild ähnlich. Die Verstimmung

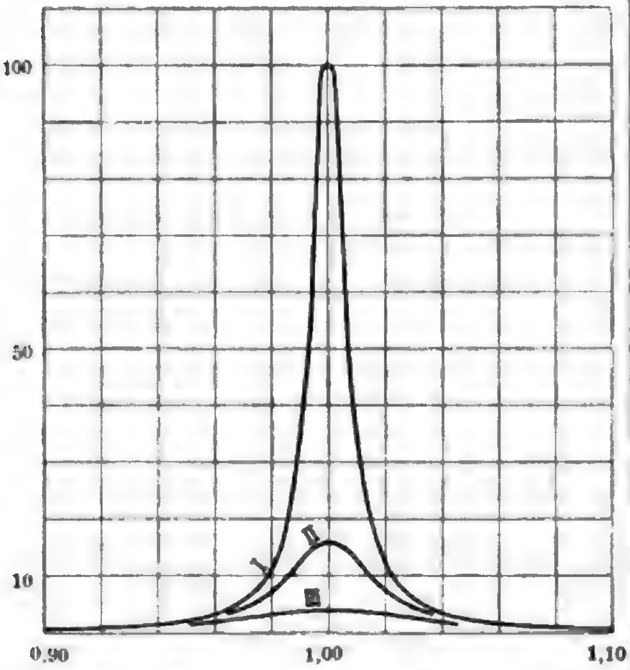


Fig. 3. Resonanzkurven der Intensität J bei konstanter Erregungsamplitude für verschiedene Dämpfungen; natürl. logar. Dekrement $\mathfrak{b}$ von System I 0,046, von II 0,115, von III 0,230. Abszissen: Frequenzverhältnis (Verstimmung) $\frac{\nu}{\omega_0}$ Ordinaten: Intensität J (Resonanzintensität des wenigst gedämpften Systems I = 100 gesetzt).

der erregenden Schwingung gegen die Eigenschwingung, d. h. die Abweichung des Verhältnisses $\frac{\nu}{\omega_0}$ (oder $\frac{\nu}{\omega}$ was mit zu vernachlässigendem Fehler dafür gesetzt werden kann) von dem Werte Eins schreitet in der für akustische Zwecke berechneten Tabelle nach Stufen von $\frac{1}{80}$ fort, so daß das erste verstimmte Intervall dasjenige des syntonischen Kommas 81:80, das letzte das des großen Ganztones 90:80 bezw. 80:90 ist.

In dem beschriebenen Fall ist die Resonanzkurve symmetrisch um die Resonanzordinate, wenn man als Abszissen nicht ν, sondern den Quotienten $\frac{\nu}{\omega_0}$ aufträgt. Denn aus der Form der Gleichung (10) folgt, daß eine Vertauschung von $\frac{\nu}{\omega_0}$ mit dem reziproken Wert $\frac{\omega_0}{\nu}$ den Ordinatenwert J nicht ändert; d. h. eine Verstimmung um das gleiche Intervall nach oben oder unten bewirkt die gleiche Schwächung des Mitschwingens. In der Praxis, z. B. bei elektrischen Schwingungen, kommen neben symmetrischen auch unsymmetrische Resonanzkurven vor..

3. Schwingung bei komplizierter Form der erregenden Kraft. Selektivvermögen des Resonators. Wirken auf das resonierende System gleichzeitig zwei oder mehr ungedämpfte erregende Schwingungen, d. h. periodische Kräfte, verschiedener Frequenz, so erzeugt jede von ihnen eine erzwungene Schwingung ihrer eigenen Periode nach Gleichung (7) und (8), die sich übereinanderlagern. Die Amplituden dieser einzelnen Schwingungen sind im allgemeinen von gleicher Größenordnung, wenn die Amplituden A der erregenden Schwingungen und die Frequenzen ν nicht gerade sehr verschieden sind. Ist jedoch die Frequenz einer dieser Schwingungen nahezu gleich der Eigenfrequenz des resonierenden Systems, so wird diese Schwingung besonders begünstigt; die erzwungene Schwingung dieser Frequenz wird viel stärker als die anderen, das resonierende System verhält sich auswählend. Unter Umständen, nämlich wenn es schwach gedämpft ist, reagiert es merklich überhaupt nur auf Schwingungen, deren Frequenzen seiner Eigenfrequenz sehr nahe kommen.

Eine periodische, nicht-sinusförmige Kraft von beliebiger Form läßt sich nach dem Fourierschen Satze immer als eine Reihe übereinandergelagerter harmonischer Schwingungen auffassen mit den Frequenzen ν, 2ν, 3ν usw., wenn die Grundfrequenz ν ist. Die Wirkung einer derartigen Kraft ergibt sich nach dieser Darlegung aus dem Vorhergehenden. Das resonierende System reagiert auf diejenige, in der Erregungsschwingung enthaltene, Partialschwingung am stärksten — unter Umständen praktisch merklich nur auf sie —, deren Frequenz der Eigenfrequenz des Systems am nächsten kommt.

4. Schwingung bei gedämpfter sinusförmiger Erregung. Komplizierter werden die Verhältnisse, wenn die erregenden Schwingungen selbst gedämpft sind. Eine exponentiell gedämpfte erregende Schwingung mit der Frequenz ν und der Dämpfung ε von der Form $Ae^{-\varepsilon t}\sin\nu t$ statt der ungedämpften $A\sin\nu t$ in Gleichung (6a) führt auf die Differentialgleichung

$$(11)\quad \frac{d^2x}{dt^2}+2\delta\frac{dx}{dt}+\omega_0^2x = Ae^{-\varepsilon t}\sin\nu t$$

mit der allgemeinen Lösung

$$(12)\quad x = ae^{-\varepsilon t}\sin(\nu t-\Theta)+\mathfrak{A}e^{-\delta t}\sin(\omega t+\vartheta)$$

wobei wieder $\omega=\sqrt{\omega_0^2-\delta^2}$ ist. Die Ampli-

tude $ae^{-\varepsilon t}$ und die Phasenkonstante Θ sind

$$(13)\quad ae^{-\varepsilon t} = \frac{Ae^{-\varepsilon t}}{\sqrt{[\omega^2 - \nu^2 + (\delta - \varepsilon)^2]^2 + 4\nu^2(\delta - \varepsilon)^2}}$$

$$(14)\quad \begin{cases} \operatorname{tg} \Theta = \dfrac{2\nu(\delta - \varepsilon)}{\omega^2 - \nu^2 + (\delta - \varepsilon)^2} \\ \sin \Theta = \dfrac{2\nu(\delta - \varepsilon)}{\sqrt{[\omega^2 - \nu^2 + (\delta - \varepsilon)^2]^2 + 4\nu^2(\delta - \varepsilon)^2}} \\ \cos \Theta = \dfrac{\omega^2 - \nu^2 + (\delta - \varepsilon)^2}{\sqrt{[\omega^2 - \nu^2 + (\delta - \varepsilon)^2]^2 + 4\nu^2(\delta - \varepsilon)^2}} \end{cases}$$

Hier hängt die Amplitude außer von δ auch noch von der Differenz $\delta - \varepsilon$ der beiden Dämpfungen ab. Ferner kann hier die Phasenverzögerung negativ werden, d. h. in ein Vorauseilen der erzwungenen Schwingung übergehen, wenn nämlich $\delta < \varepsilon$ ist. Ist $\delta > \varepsilon$, so geht die Phasendifferenz Θ von 0 über $+ 90^\circ$ bis $+ 180^\circ$, wenn ν von 0 bis ∞ wächst; ist $\delta < \varepsilon$, so geht sie ebenso von 0 über $- 90^\circ$ bis $- 180^\circ$. Die Phasendifferenzen $\pm \frac{\pi}{2}$ (d. h. $\pm 90^\circ$) treten für $\nu = \sqrt{\omega^2 + (\delta - \varepsilon)^2}$ ein, also für einen dicht bei ω_0 gelegenen Wert von ν. Ist $\delta - \varepsilon$ sehr klein, so ist die Phasendifferenz für alle Werte von $\nu < \sqrt{\omega^2 + (\delta - \varepsilon)^2}$ nahezu Null, für alle größeren nahezu $+ 180^\circ$ bezw. $- 180^\circ$: nur in unmittelbarer Umgebung der Stelle $\nu = \sqrt{\omega^2 + (\delta - \varepsilon)^2}$ ist sie hiervon merklich verschieden, sie steigt hier auf einer kurzen Strecke plötzlich von 0 auf $\pm 180^\circ$ an. Vgl. das analoge Verhalten bei ungedämpfter Erregung.

Die erzwungene Schwingung ist selbst gedämpft und zwar mit der Dämpfung ε der erregenden Schwingung.

Der Vorgang wird also nicht mehr nach einiger Zeit stationär wie bei ungedämpfter Erregung, sondern die Schwingung, entstanden aus der Uebereinanderlagerung der erzwungenen und der Eigenschwingung, klingt an, erreicht ein Maximum und fällt dann allmählich auf Null herab. Verhältnismäßig einfach wird das Bild, wenn die Frequenzen beider, ν und ω, gleich sind. Die Figur 4 zeigt das Schwingungsbild für das natürliche logarithmische Dekrement $\mathfrak{d} = 0{,}2$ der Eigenschwingung und $\mathfrak{d} = 0{,}08$ der erregenden Schwingung in diesem Falle.

Wie bei den ungedämpften erregenden Schwingungen können auch hier gleichzeitig mehrere erregende Schwingungen wirken, die sich aber nicht nur durch ihre Frequenzen, sondern auch durch ihre Dämpfungen unterscheiden können. Die einzelnen erzwungenen Schwingungen lagern sich ebenfalls übereinander. Für alle Formen von erregenden Schwingungen S(t), die sich aus exponentiell gedämpften Sinusschwingungen zusammensetzen lassen, kann somit die erzwungene Schwingung hier berechnet werden. Doch wird das Bild derselben sehr unübersichtlich.

5. Bestimmung der Frequenz und der Dämpfung aus der Resonanzkurve. Aus der Resonanzkurve läßt sich die Eigenfrequenz ω und die Dämpfung δ (bezw. das logarithmische Dekrement $\mathfrak{d}$) des resonierenden Systems bestimmen, indem man die in Nr. 2 angegebenen Beziehungen zwischen ω, δ und der Resonanzfrequenz ν_r und die Formeln für den Verlauf der Intensität bezw. Amplitude in der Umgebung der Resonanzstelle benutzt.

Ist die Eigenfrequenz ω schon bekannt, so erhält man sofort ohne nähere Kenntnis der Resonanzkurve

$$(15)\quad \delta = \sqrt{\omega^2 - \nu_r^2} \text{ und}$$

$$\mathfrak{d} = \frac{2\pi\delta}{\omega} = 2\pi \sqrt{1 - \frac{\nu_r^2}{\omega^2}}.$$

Ist ω aber auch unbekannt, so muß man wenigstens zwei Punkte der Resonanzkurve kennen, d. h. zwei Paar zusammengehörige Werte von Erregungsfrequenz ν und zugehöriger erregter Intensität oder Amplitude. Sehr gut ist es, wenn eines dieser Paare für

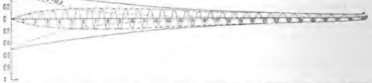


Fig. 4. Erzwungene Schwingungen eines zurzeit t = 0 in Ruhe befindlichen gedämpften Systems bei Resonanz mit der (gedämpften) erregenden Schwingung. Strich-punktierete Kurve —·—·—: Amplitudenkurve der Eigenschwingung (nat. log. Dekrem. $\mathfrak{d} = 0{,}2$). Ausgezogene Kurve ——: Amplitudenkurve der erregenden Schwingung (nat. log. Dekrem. $\mathfrak{d} = 0{,}08$). Gestrichelte Kurve --------: Amplitudenkurve der resultierenden Schwingung.

die Resonanzstelle selbst gilt. Für den wichtigsten, vierten der vier Fälle von Nr. 2, wo die Resonanzkurve die Intensität der erzwungenen Schwingung bei konstanter Erregungsintensität darstellt, erhält man unter diesen Umständen als logarithmisches Dekrement

$$(16) \qquad \mathfrak{d} = \pm \frac{\pi(\nu_r^2 - \nu^2)}{\omega^2} \sqrt{\frac{J}{J_r - J}}$$

$$= \pm \frac{\pi(\nu_r + \nu)(\nu_r - \nu)}{\omega^2} \sqrt{\frac{J}{J_r - J}}$$

J_r, ν_r und J, ν sind die zusammengehörigen Wertepaare. Je nachdem ν kleiner oder größer als ν_r ist, ist das positive oder negative Vorzeichen zu nehmen, damit $\mathfrak{d}$ eine positive Zahl wird (vgl. Fig. 5).

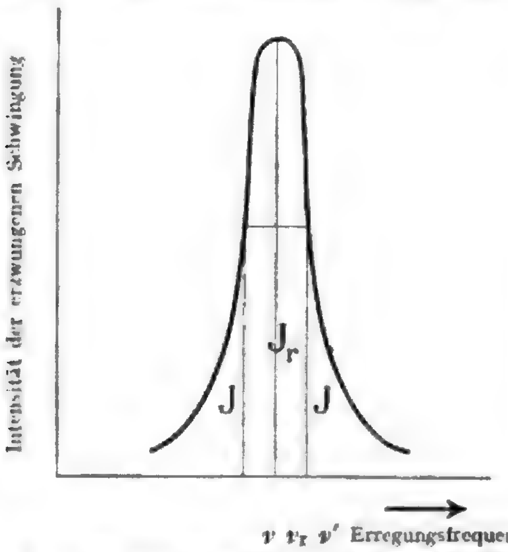


Fig. 5. Dekrementbestimmung aus der Resonanzkurve.

Liegt nun ν nahe bei ν_r, so kann man mit geringem Fehler $2\nu_r$ oder 2ν für $\nu_r + \nu$ setzen. Bei hinreichend schwacher Dämpfung — in der Praxis stets — kann man ω^2 durch ν_r^2 oder weiter durch ν^2 ersetzen und erhält mit Wegfall von ω die Näherungsformel

$$(17) \qquad \mathfrak{d} = \pm \frac{2\pi(\nu_r - \nu)}{\nu_r} \sqrt{\frac{J}{J_r - J}}$$

$$= \pm \frac{2\pi(\nu_r - \nu)}{\nu} \sqrt{\frac{J}{J_r - J}}.$$

Noch brauchbarer wird sie, wenn man auch ν_r daraus entfernt, indem man zwei in der Nähe von ν_r gelegene Frequenzen ν und ν' bestimmt, für welche die Intensität den gleichen Wert J besitzt. Dann ist näherungsweise $2\nu_r = \nu' + \nu$ und man erhält

$$(18) \qquad \mathfrak{d} = \pm \frac{\pi(\nu' - \nu)}{\nu_r} \sqrt{\frac{J}{J_r - J}}$$

$$= \pm \frac{2\pi(\nu' - \nu)}{\nu' + \nu} \sqrt{\frac{J}{J_r - J}}.$$

Dieselben Formeln gelten auch für die anderen noch in Betracht kommenden Fälle der Resonanzkurve. Nur ist dabei unter dem Wurzelzeichen J und J_r bezw. a^2 und a_r^2 statt J und J_r zu setzen.

Ist die erregende Schwingung ungedämpft, so ist das so berechnete $\mathfrak{d}$ das Dekrement des resonierenden Systems allein. Ist aber die erregende Schwingung selbst gedämpft, so stellt dies $\mathfrak{d}$ nach V. Bjerknes die Summe $\mathfrak{d}_1 + \mathfrak{d}_2$ der Dekremente von erregender Schwingung und resonierendem System dar. Um $\mathfrak{d}_1$ und $\mathfrak{d}_2$ einzeln zu erhalten, kann man so verfahren, daß man das eine Dekrement, etwa dasjenige des resonierenden Systems $\mathfrak{d}_2$, um einen bekannten Betrag $\mathfrak{d}_2'$ ändert und das neue Gesamtdekrement $\mathfrak{d}_1 + \mathfrak{d}_2 + \mathfrak{d}_2' = \mathfrak{d}'$ bestimmt. Aus diesen beiden Werten $\mathfrak{d}$ und $\mathfrak{d}'$ läßt sich dann $\mathfrak{d}_1$ und $\mathfrak{d}_2$ berechnen.

B. Systeme mit nicht-sinusförmiger Eigenschwingung.

6. Schwingungsgleichung bei nicht-sinusförmiger Eigenschwingung. Die Mannigfaltigkeit der möglichen Fälle gestattet keine ausführliche Behandlung. Außerdem ist die Theorie nur für ganz wenige Fälle bekannt.

Die allgemeine Differentialgleichung der Bewegung eines Schwingungssystems mit einem Freiheitsgrade x (Massenpunkt M) unter der Einwirkung einer nur von der Lagekoordinate x abhängigen rücktreibenden Kraft $f(x)$, einer von Lage x und Geschwindigkeit $\frac{dx}{dt}$ abhängigen hemmenden Kraft $R\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$ und einer von x und $\frac{dx}{dt}$ unabhängigen, nur von der Zeit t abhängenden, eingeprägten äußeren Kraft $S(t)$ ist

$$(19) \qquad M\frac{d^2x}{dt^2} = f(x) + R\left(x, \frac{dx}{dt}\right) + S(t).$$

Sie geht in die vorher behandelten Formen über, wenn man $f(x) = -Dx$, ferner

$$R\left(x, \frac{dx}{dt}\right) = -R\frac{dx}{dt} \quad \text{und} \quad S(t) = A' \sin \nu t$$

bezw. $= A'e^{-\varepsilon t} \sin \nu t$ setzt.

Eine Reihe von interessanten Fällen erhält man, wenn man die hemmende Kraft, wie bisher, der augenblicklichen Geschwindigkeit proportional annimmt, die rücktreibende quasielastische Kraft aber durch eine solche von anderer Form ersetzt; wenn man also wieder $R\left(x, \frac{dx}{dt}\right) = -R\frac{dx}{dt}$ setzt, für $f(x)$ aber eine Potenzreihe

$$(20) \qquad f(x) = -Dx - D'x^2 - D''x^3 - \ldots$$

einführt. Diese Potenzreihe umfaßt nicht alle möglichen Formen, die die rücktreibende Kraft haben kann; sie enthält z. B. nicht die symmetrischen Kräfte, welche von geraden Potenzen der Entfernung x abhängen. Um auch diese zu berücksichtigen, muß man etwa setzen

$$f(x) = -Dx \mp D'x^2 - D''x^3 \mp \ldots \tag{21}$$

und die oberen Vorzeichen für positive, die unteren für negative Ausschläge x gelten lassen. Die Reihe kann sich natürlich auch auf eine endliche Anzahl von Gliedern beschränken. Wird $f(x) = -Dx - D'x^2$, so erhält man den theoretisch einfachsten Fall unsymmetrischer Kraft (unsymmetrischer Elastizität) usw.

Eine andere Reihe interessanter Fälle ergibt sich, wenn man $f(x) = -Dx$ läßt, aber für die dämpfende Kraft R einen anderen Ansatz macht

$$R\left(x, \frac{dx}{dt}\right) = -b\frac{dx}{dt} \mp b'\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - b''\left(\frac{dx}{dt}\right)^3 \mp \ldots \tag{22}$$

wobei auch wieder die Vorzeichen der Glieder mit geraden Potenzen alternierend gewählt werden müssen, wenn die hemmende Kraft zu beiden Seiten der Ruhelage symmetrisch wirken soll.

Im allgemeinsten Falle können die Ansätze (21) und (22) kombiniert vorkommen. In allen diesen Fällen erhält man Eigenschwingungen von komplizierter, teils symmetrischer, teils unsymmetrischer Form.

Läßt man auf ein solches System eine ungedämpfte sinusförmige Kraft $S(t) = A' \sin \nu t$ wirken, so erhält man eine rein periodische erzwungene Schwingung von der Frequenz ν der Kraft S(t), der sich eine gedämpfte, der Eigenschwingung mehr oder weniger ähnliche Schwingung überlagert. Nach deren Erlöschen bleibt nur die erzwungene Schwingung. Diese ist zwar rein periodisch, aber keineswegs mehr einfach sinusförmig. Sie ist somit durch eine Fourierreihe darstellbar, enthält also harmonische Partialschwingungen von den Frequenzen ν, 2ν, 3ν usw.

Es ist freilich immer möglich, auch bei einem solchen System rein sinusförmige erzwungene Schwingungen zu erzeugen. Dazu muß S(t) von geeigneter Form sein, die man leicht erhält, indem man in Gleichung (19) $x = a \sin \nu t$ setzt und S(t) berechnet. Wenn f(x) und $R\left(x, \frac{dx}{dt}\right)$ durch Potenzreihen darstellbar sind, so ergibt sich für S(t) immer eine Fourierreihe mit der Grundfrequenz ν. Sind die Abweichungen von dem linearen Kraft- und Dämpfungsgesetz nur klein, d. h. sind die Koeffizienten der höheren Potenzen in den Entwickelungen für f und R klein, so überwiegt das Glied mit der Grundfrequenz ν. Im allgemeinen ist die hier angedeutete Frage von keiner besonderen Bedeutung.

7. Kombinationsschwingungen und -töne. Wichtig und interessant ist das Verhalten eines Systems mit nicht-sinusförmiger Eigenschwingung unter der Einwirkung mehrerer Sinusschwingungen verschiedener Frequenz. Einen derartigen Fall hat Helmholtz zuerst behandelt, um die Entstehung der Kombinationstöne zu erklären. Ein System mit unsymmetrischer Elastizität einfachster Art wird von zwei Sinusschwingungen mit den Frequenzen p und q erregt. Die Bewegungsgleichung ist

$$M\frac{d^2x}{dt^2} = -ax - bx^2 - k\frac{dx}{dt} - f\sin pt - g\sin(qt + c) \tag{23}$$

oder nach Division durch M

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x + \alpha x^2 + 2\delta\frac{dx}{dt} + f'\sin pt + g'\sin(qt + c) = 0. \tag{24}$$

Helmholtz setzt zur Integration x als Funktion einer neuen Hilfsgröße η in der Form an

$$x = \eta x_1 + \eta^2 x_2 + \eta^3 x_3 + \ldots \tag{25}$$

Durch Einsetzen in (24) erhält man Glieder mit η, solche mit η^2, mit η^3 usw. Faßt man die Glieder gleicher Potenzen zusammen und setzt ihre Koeffizienten gleich Null, so ergeben sich zur formalen Befriedigung der Gleichungen (24) die Gleichungen

$$\left\{\begin{aligned} &\frac{d^2x_1}{dt^2} + 2\delta\frac{dx_1}{dt} + \omega_0^2 x_1 + f'_1 \sin pt + g'_1 \sin(qt + c) = 0 \\ &\frac{d^2x_2}{dt^2} + 2\delta\frac{dx_2}{dt} + \omega_0^2 x_2 + \alpha x_1^2 = 0 \\ &\frac{d^2x_3}{dt^2} + 2\delta\frac{dx_3}{dt} + \omega_0^2 x_3 + 2\alpha x_1 x_2 = 0 \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{aligned}\right. \tag{26}$$

wobei

$$f'_1 = \frac{f}{\eta M}, \quad g'_1 = \frac{g}{\eta M}. \tag{27}$$

Die erste dieser Gleichungen ist die Gleichung einer erzwungenen Schwingung, die aus zwei Sinusschwingungen mit den Frequenzen p und q besteht. Mit Weglassung des gedämpften Eigenschwingungsgliedes $\mathfrak{A}e^{-\delta t}\sin(\omega t + \Theta)$, wo $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ist, lautet daher das Integral x_1 dieser ersten Gleichung

$$x_1 = \varrho \sin(pt - \chi) + \sigma \sin(qt + c - \psi), \tag{28}$$

wobei ϱ und σ die Amplituden, χ und ψ die Phasenkonstanten sind, die sich, wie früher angegeben, berechnen lassen. Dieser Ausdruck (28) von x_1 wird in die zweite Gleichung des Systems (26) eingesetzt. Das

Glied αx_1^2 stellt dabei die äußere Kraft dar, welche auf ein Schwingungssystem mit exponentiell gedämpfter sinusförmiger Eigenschwingung wirkt. Diese Kraft ist hier also

$$(29) \quad \alpha x_1^2 = \alpha \varrho^2 \sin^2 (pt-\chi) + \alpha \sigma^2 \sin^2 (qt+c-\psi) + 2\alpha\varrho\sigma \sin (pt-\chi) \sin (qt+c-\psi).$$

Durch bekannte Umformung der Quadrate und Produkte der trigonometrischen Funktionen erhält man sie in der Form einer Summe von Cosinusgliedern mit den Frequenzen 2p, 2q, p + q und p — q. Die erzwungene Schwingung x_2 muß also ebenfalls Schwingungen dieser Frequenzen enthalten.

Nimmt man statt (28) den vollständigen Ausdruck für x_1, der auch das Eigenschwingungsglied enthält, so kommen noch die Frequenzen 2ω, $\omega + p$, $\omega - p$, $\omega + q$, $\omega - q$ dazu. Die entsprechenden Glieder sind aber alle gedämpft und verschwinden daher schließlich.

In derselben Weise kann man fortfahren und erhält für x_3 eine erzwungene Schwingung, bestehend aus Sinusschwingungen zum Teil mit den bisherigen Frequenzen und außerdem mit neuen Kombinationen derselben, wie 3p, 3q, p — 2q usw.

Durch Einsetzen aller Werte x_1, x_2 ... in (25) ergibt sich x in der Form einer aus Sinus- oder Cosinusschwingungen zusammengesetzten Schwingung. Die Frequenzen dieser Teilschwingungen haben die allgemeine Form

$$(30) \quad \omega = \pm hp \pm kq \qquad \begin{pmatrix} h = 0, 1, 2 \ldots \\ k = 0, 1, 2 \ldots \end{pmatrix}$$

Wirken mehr als zwei Kräfte, so kommen zu ω noch weitere Glieder hinzu, $\pm$ lr usw. (r = Frequenz, l = 0, 1, 2 ...). Ordnet man die Glieder von (25) nach steigenden Frequenzen ω, so erhält x die Form einer Fourierreihe. Grundfrequenz, d. h. Frequenz der Grundschwingung dieser Reihe ist diejenige, welche den größten gemeinschaftlichen Teiler von p und q bildet. Ist z. B. p = 500, q = 300, so ist die Frequenz der Grundschwingung in der erzwungenen Schwingung = 100, dem größten Teiler beider Zahlen. Dies ist, wie man nachrechnen kann, zugleich der kleinste der Werte ω, die sich aus (30) ergeben.

Die nach (30) zu berechnenden Frequenzen sind die Frequenzen der „Kombinationstöne", oder, allgemeiner gesprochen, der Kombinationsschwingungen, die sich bei nichtlinearen Differentialgleichungen der Bewegung des resonierenden Systems ergeben, wenn gleichzeitig mehrere sinusförmige Kräfte auf dasselbe wirken. Sie zerfallen in **Differenz- und Summationsschwingungen bzw. -töne**, wenn man bei dem gebräuchlicheren akustischen Namen bleiben will. Solche Kombinationsschwingungen ergeben sich nicht nur aus der Helmholtzschen Gleichung (23), sondern, wie leicht zu übersehen ist, aus jeder nichtlinearen Differentialgleichung, also z. B. auch, wenn symmetrische Elastizität angenommen wird, d. h. wenn das Glied bx^2 in Gleichung (23) mit alternierendem Vorzeichen eingeführt wird, oder wenn noch ein Glied cx^3 oder eins mit noch höherer Potenz darin vorkommt, oder schließlich auch, wenn noch ein quadratisches Reibungsglied $k'\left(\frac{dx}{dt}\right)^2$ hineinkommt usw. Nur die Amplituden (und Phasen) der einzelnen Glieder, aus denen sich die gesamte erzwungene Schwingung zusammensetzt, sind in jedem Falle andere.

Auch ohne das eigenartige Helmholtzsche Integrationsverfahren, das in neuerer Zeit von Cl. Schaefer, Waetzmann u. a. in etwas veränderter Form auf andere Fälle angewandt worden ist, läßt sich zeigen, daß im allgemeinen bei Systemen mit nicht-linearen Eigenschwingungsgleichungen immer diese Kombinationsschwingungen auftreten müssen, wenn solche Systeme gleichzeitig von mehreren sinusförmigen periodischen Kräften erregt werden. Diese sinusförmigen Kräfte setzen sich natürlich zu einer nicht mehr sinusförmigen, aber periodischen Kraft zusammen, deren Periode gleich der kleinsten Zeit ist, in der alle Einzelperioden als ganzzahlige Vielfache enthalten sind. Ihre Frequenz ist daher gleich dem größten gemeinschaftlichen Teiler der Einzelfrequenzen p, q, r ... Ist dieser Teiler = a, so ist also p = ma, q = na usw., wo m, n ... ganze Zahlen sind.

Die erzwungene Schwingung muß nun offenbar auch rein periodisch sein und zwar mit der Periode der erregenden Kraft, d. h. also mit der Frequenz a. Ihre Form ist aber im allgemeinen natürlich nicht sinusförmig. Sie wird somit durch eine Fourierreihe darstellbar sein, deren Grundschwingung die Frequenz a hat; die höheren Schwingungen haben die Frequenzen 2a, 3a usf. Das sind aber genau die Werte, die sich auch aus der Formel (30) für die Kombinationsschwingungen ergeben, wenn man dort p = ma, q = na usw. setzt. Welche von den einzelnen Komponenten in der erzwungenen Schwingung wirklich bezw. merklich vorhanden sind, hängt von der besonderen Form der Eigenschwingungen ab und läßt sich nicht allgemein angeben.

II. Systeme mit mehreren Freiheitsgraden.

8. Energie und Bewegungsgleichungen der Punktsysteme. Nur solche Systeme sollen hier genauer besprochen werden, deren Eigenschwingungen durch lineare Differentialgleichungen geregelt werden. Letzteres ist bei mechanischen Systemen immer der Fall, wenn alle vorkommenden Elongationen als unendlich klein gelten können. Bei elektromagnetischen Schwingungskreisen fällt diese Beschränkung weg.

Die Bewegungsgleichungen derartiger Systeme lassen sich in den verallgemeinerten

Lagrangeschen Koordinaten $x_1, x_2, \ldots x_m$ und „Geschwindigkeiten" $\dot{x}_1 = \frac{dx_1}{dt}$, $\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt}, \ldots$ ausdrücken, wenn man die kinetische Energie U, die potentielle Energie W und nötigenfalls auch die während der Zeiteinheit in andere Energieformen (Wärme usw.) umgewandelte (zerstreute) Energie 2F als Funktion der Koordinaten x und $\dot{x}$ kennt. Die Betrachtung gilt nicht nur für mechanische, sondern auch für elektromagnetische Systeme. Die schwingungsfähigen Massenpunkte sind in diesem Falle durch elektrische Schwingungskreise zu ersetzen, die Koordinaten x usw. sind die elektrischen Spannungen oder Stromstärken usw.

Für jeden Freiheitsgrad, d. h. jede unabhängige Koordinate x_i gilt eine Bewegungsgleichung von der Form

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial U}{\partial \dot{x}_i}\right) - \frac{\partial U}{\partial x_i} + \frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i} + \frac{\partial W}{\partial x_i} = X_i; \tag{31}$$

im ganzen gibt es soviel solcher Gleichungen, wie Freiheitsgrade der Bewegung.

Die kinetische Energie U ist immer eine quadratische Funktion der Geschwindigkeiten $\dot{x}$, die Energien W und F sind in den in Betracht kommenden Fällen ebenfalls quadratische Funktionen, W von den Koordinaten x, F von den Geschwindigkeiten $\dot{x}$, also

$$(32)\quad \begin{cases} U = \frac{a_{11}}{2}\dot{x}_1^2 + \frac{a_{22}}{2}\dot{x}_2^2 + \ldots \\ \quad + a_{12}\dot{x}_1\dot{x}_2 + a_{13}\dot{x}_1\dot{x}_3 + \ldots \\ F = \frac{b_{11}}{2}\dot{x}_1^2 + \frac{b_{22}}{2}\dot{x}_2^2 + \ldots \\ \quad + b_{12}\dot{x}_1\dot{x}_2 + b_{13}\dot{x}_1\dot{x}_3 + \ldots \\ W = \frac{c_{11}}{2}x_1^2 + \frac{c_{22}}{2}x_2^2 + \ldots \\ \quad + c_{12}x_1x_2 + c_{13}x_1x_3 + \ldots \end{cases}$$

Die auf den Punkt M_i in der Richtung x_i wirkende treibende und die entsprechende hemmende Kraft ist in jedem Falle, auch wenn F und W keine quadratische Funktionen sind, gleich dem negativen partiellen Differentialquotienten $-\frac{\partial W}{\partial x_i}$ und $-\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i}$. Bei elektromagnetischen Schwingungskreisen ist U die magnetische, W die elektrische Energie, 2F die Joulesche Wärme, wenn man unter $x_1, x_2 \ldots$ die elektrischen Spannungen (Potentiale) in den Schwingungskreisen versteht. Wenn $x_1, x_2 \ldots$ die gewöhnlichen Kartesischen Linienkoordinaten sind, so sind $a_{11}, a_{22} \ldots$ die Massen $M_1 \ldots$ der einzelnen Punkte.

Das System der Gleichungen (31) gibt erzwungene Schwingungen, wenn die Kräfte X_i periodische Funktionen der Zeit sind; es führt zu den Eigenschwingungen oder natürlichen Schwingungen des Punktsystems, wenn die Kräfte $X_i = 0$ sind. Jeder der Punkte führt in letzterem Falle gewisse ihm eigentümliche Schwingungen aus. Seine Bewegung ist aber nicht frei, sondern an diejenige der anderen Punkte gebunden; das Ganze ist ein aus Teilsystemen bestehendes gekoppeltes Schwingungssystem.

Die gekoppelten Schwingungen sind in dieser Auffassung als Eigenschwingungen den freien oder Eigenschwingungen eines Systems mit einem Freiheitsgrad gleichwertig. Andererseits stehen sie aber auch den erzwungenen Schwingungen eines solchen Systems gleich; denn die Kräfte, welche auf einen Punkt eines mehrfachen Punktsystems von den übrigen Punkten ausgeübt werden, sind ebenfalls periodisch, wenn die Punkte schwingen. Man kann sie sogar formell zu äußeren Kräften machen, da man das ganze System nach Belieben zerlegen und nur einen gewissen Teil desselben als „Schwingungssystem" betrachten kann. Die von den übrigen Teilen auf dasselbe ausgeübten Kräfte sind dann äußere oder eingeprägte. Der Unterschied gegen früher ist aber der, daß diese neueingeführten äußeren Kräfte selbst wieder von der Bewegung des Punktes abhängen, auf den sie wirken. Mit anderen Worten: es findet hier eine Rückwirkung des von der äußeren Kraft, der erregenden Schwingung, beeinflußten Systems auf die erregende Schwingung statt, was früher nicht der Fall war. Man kann daher die gekoppelten Eigenschwingungen als erzwungene Schwingungen mit Rückwirkung des resonierenden (sekundären) Systems auf das erregende (primäre) System ansehen. Mit Rücksicht auf die mathematische Behandlung dieser Systeme empfiehlt sich aber die erste Anschauung. Nach dieser spricht man von erzwungenen Schwingungen nur, wenn die eingeprägten Kräfte von der Bewegung des Systems unabhängig sind. Diese, die eigentlichen erzwungenen Schwingungen der gekoppelten Systeme werden allein hier behandelt, und zwar eingehend nur an dem Fall des Systems von zwei Freiheitsgraden, das aus zwei Teilsystemen zusammengekoppelt ist.

Bei Geltung der Gleichungen (32) für die Energien, also bei unendlich kleinen Elongationen der Punkte, wird das System der Bewegungsgleichungen

$$(33)\quad \begin{cases} a_{11}\frac{d^2x_1}{dt^2} + a_{12}\frac{d^2x_2}{dt^2} + \ldots \\ \quad + b_{11}\frac{dx_1}{dt} + b_{12}\frac{dx_2}{dt} + \ldots \\ \quad + c_{11}x_1 + c_{12}x_2 + \ldots = X_1, \\ a_{12}\frac{d^2x_1}{dt^2} + a_{22}\frac{d^2x_2}{dt^2} + \ldots \\ \quad + b_{12}\frac{dx_1}{dt} + b_{22}\frac{dx_2}{dt} + \ldots \\ \quad + c_{12}x_1 + c_{22}x_2 + \ldots = X_2, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{cases}$$

In jeder dieser Gleichungen geben die Glieder, welche eine Koordinate (z. B. x_1) mit dem-

selben Index wie die rechtsstehende Kraft enthalten, für sich allein zusammengenommen die Bewegungsgleichung der (erzwungenen) Schwingung des betreffenden freien Teilsystems; die übrigen Glieder der Gleichung sind die Koppelungsglieder. Die Koeffizienten dieser Koppelungsglieder hängen mit den Koppelungskoeffizienten eng zusammen. Nach der Bezeichnung von M. Wien werden als Koppelungskoeffizienten die im folgenden $\varrho_1, \sigma_1, \vartheta_1, \varrho_2, \sigma_2, \vartheta_2$ usw. genannten Größen bezeichnet. Für den Fall eines aus nur zwei einfachen Teilsystemen gekoppelten Systems lassen sich mit Einführung dieser Größen die Bewegungsgleichungen schreiben

$$(34)\quad \begin{cases} \dfrac{d^2x_1}{dt^2} + 2\delta_1\dfrac{dx_1}{dt} + (\omega_1)_0{}^2x_1 + \varrho_1\dfrac{d^2x_2}{dt^2} \\ \quad + 2\delta_1\sigma_1\dfrac{dx_2}{dt} + (\omega_1)\vartheta_0{}^2{}_1x_2 = \dfrac{1}{a_{11}}X_1, \\ \dfrac{d^2x_2}{dt^2} + 2\delta_2\dfrac{dx_2}{dt} + (\omega_2)_0{}^2x_2 + \varrho_2\dfrac{d^2x_1}{dt^2} \\ \quad + 2\delta_2\sigma_2\dfrac{dx_1}{dt} + (\omega_2)_0{}^2\vartheta_2x_1 = \dfrac{1}{a_{22}}X_2. \end{cases}$$

Hier sind δ_1 und δ_2 die Dämpfungskonstanten der freien Eigenschwingungen, $\omega_1 = \sqrt{(\omega_1)_0{}^2 - \delta_1{}^2}$ und $\omega_2 = \sqrt{(\omega_2)_0{}^2 - \delta_2{}^2}$ die (Kreis-)Frequenzen derselben, $(\omega_1)_0$ und $(\omega_2)_0$ die Kreisfrequenzen der zugehörigen ungedämpften Eigenschwingungen; $\varrho_1, \sigma_1, \vartheta_1$ bzw. $\varrho_2, \sigma_2, \vartheta_2$ sind die Koeffizienten der Beschleunigungs-, Reibungs- und Kraftkoppelung. Bei elektromagnetischen Schwingungssystemen entsprechen diesen Koppelungsarten in derselben Reihenfolge die magnetische (induktive), die galvanische (konduktive) und die elektrische (kapazitive) Koppelung. Meist überwiegt eine Koppelungsart die beiden anderen so, daß man letztere und damit auch die entsprechenden Koppelungsglieder in den Gleichungen (33) und (34) vernachlässigen kann. Da dann die Wirkung der Koppelung, soweit nur die Haupt- oder Eigenschwingungen in Betracht kommen, nicht von den einzelnen Werten der ϱ bzw. σ bzw. ϑ, sondern von den Produkten $\varrho_1\varrho_2$ usw. abhängt, so bezeichnet man bekanntlich neuerdings die Größen $K = \sqrt{\varrho_1\varrho_2}$ bzw. $\sqrt{\sigma_1\sigma_2}$ bzw. $\sqrt{\vartheta_1\vartheta_2}$ als Koppelungskoeffizient oder auch -parameter schlechthin. Bei gedämpften Systemen, die in Resonanz stehen, also ungekoppelt die gleiche Frequenz ω haben, ist die eigentlich bestimmende Größe der Koppelungsgrad

$$K' = \sqrt{K^2 - \frac{(\delta_1 - \delta_2)^2}{\omega^2}} = \sqrt{K^2 - \frac{(\mathfrak{b}_1 - \mathfrak{b}_2)^2}{4\pi^2}},$$

wobei $\mathfrak{b}_1$ und $\mathfrak{b}_2$ die natürlichen logarithmischen Dekremente, bezogen auf die ganze Schwingungsperiode, sind. Bei erzwungenen Schwingungen kommen aber auch die Wienschen Koeffizienten ϱ, σ, ϑ einzeln in Betracht.

9. Aus zwei Teilsystemen gekoppeltes System, von denen eines durch eine sinusförmige Kraft erregt wird. Auf ein solches System, dessen beide Teile nur durch eine Art der Koppelung verbunden sind, möge nun eine periodische sinusförmige Kraft wirken, die unabhängig ist von der Bewegung des Systems. Die Kraft soll aber nur auf eins der beiden Teilsysteme, das primäre, direkt wirken, auf das andere, das sekundäre, erst durch Vermittelung der Koppelung. Für Kraftkoppelung (bezw. elektrische Koppelung) erhält man die Bewegungsgleichungen

$$(35)\quad \begin{cases} \dfrac{d^2x_1}{dt^2} + 2\delta_1\dfrac{dx_1}{dt} + (\omega_1)_0{}^2x_1 + \vartheta_1(\omega_1)_0{}^2x_2 \\ \qquad = A\sin\nu t \\ \dfrac{d^2x_2}{dt^2} + 2\delta_2\dfrac{dx_2}{dt} + (\omega_2)_0{}^2x_2 + \vartheta_2(\omega_2)_0{}^2x_1 \\ \qquad = 0. \end{cases}$$

Für die Rechnung setzt man bequemer statt der Sinusfunktion $A\sin\nu t$ die Exponentialfunktion $Ae^{i\nu t}$, aus der durch Trennung in den reellen und rein imaginären Teil die sinus- oder cosinusförmige Kraft hervorgeht.

Läßt man zunächst die Dämpfung außer acht, setzt also $\delta_1 = \delta_2 = 0$, so läßt sich durch den Ansatz

$$(35a)\qquad x_1 = \alpha_1 e^{i\nu t},\quad x_2 = \alpha_2 e^{i\nu t}$$

das vereinfachte Gleichungssystem leicht lösen. Man erhält in beiden Teilsystemen eine erzwungene sinusförmige Schwingung von der Frequenz ν. Die Amplituden derselben in den beiden Teilsystemen sind

$$(36)\quad \begin{cases} \alpha_1 = \dfrac{A[(\omega_2)_0{}^2 - \nu^2]}{[(\omega_1)_0{}^2 - \nu^2][(\omega_2)_0{}^2 - \nu^2] - K^2(\omega_1)_0{}^2(\omega_2)_0{}^2} \\ \alpha_2 = \dfrac{-A\vartheta_2(\omega_2)_0{}^2}{[(\omega_1)_0{}^2 - \nu^2][(\omega_2)_0{}^2 - \nu^2] - K^2(\omega_1)_0{}^2(\omega_2)_0{}^2} \end{cases}$$

Es sind jedoch die absoluten Werte ohne Rücksicht auf das Vorzeichen zu nehmen. Negatives Vorzeichen bedeutet nur eine Phasenverschiebung um 180°, was hier nicht in Betracht kommt. Läßt man nun wieder die Frequenz ν der Erregung von Null bis unendlich variieren, so erhält man die Resonanzkurven. Wie bei einfachen Resonanzsystemen hat man auch hier vier Fälle zu unterscheiden, je nachdem man die Amplitude oder die Intensität der erzwungenen Schwingung ins Auge faßt, und je nachdem man die Amplitude oder die Intensität der erregenden Schwingung bei variierender Frequenz konstant hält. Der wichtigste und zugleich rechnerisch einfachste Fall ist die Resonanzkurve für die Intensitäten J_1 und J_2 der erzwungenen

Schwingung im Primär- und Sekundärsystem, die man bei konstanter Intensität J der erregenden Schwingung erhält. Es ergibt sich folgendes Bild bei ungedämpfter Erregung und ungedämpften Systemen.

Beide Systeme schwingen mit der Frequenz ν der Erregung. Die Intensität des Mitschwingens ist am größten, wenn ν mit den Eigenfrequenzen $(\omega_a)_0$ und $(\omega_b)_0$ der beiden Hauptschwingungen des gekoppelten Systems zusammenfällt. Diese Eigenfrequenzen der ungedämpften gekoppelten Systeme, also im vorliegenden Falle zugleich die Resonanzfrequenzen, sind

$$(37)\qquad \left.\begin{matrix}(\omega_a)_0\\(\omega_b)_0\end{matrix}\right\} = \sqrt{\frac{(\omega_1)_0^2+(\omega_2)_0^2}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{[(\omega_1)_0^2-(\omega_2)_0^2]^2 + 4\vartheta_1\vartheta_2(\omega_1)_0^2(\omega_2)_0^2}}\,.$$

Wegen des Vorhandenseins zweier Eigenfrequenzen hat die Resonanzkurve zwei Maxima. Dazwischen liegt ein Minimum der Intensität und zwar im primären System bei der Frequenz $\nu = (\omega_2)_0$, im sekundären bei der Frequenz $\nu = \sqrt{\frac{(\omega_1)_0^2+(\omega_2)_0^2}{2}}$. Dieser letztere Wert liegt zwischen den ungekoppelten Eigenfrequenzen $(\omega_1)_0$ und $(\omega_2)_0$. Die Figur 5a zeigt den Verlauf der Kurven

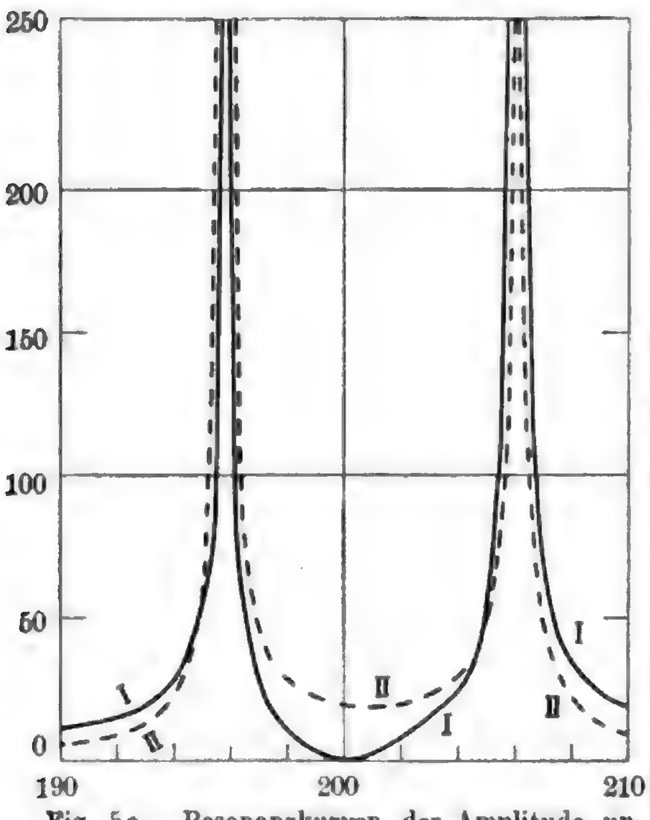


Fig. 5a. Resonanzkurven der Amplitude ungedämpfter gekoppelter Systeme I und II bei ungedämpfter Erregung mit konstanter Amplitude. Ausgezogene Kurve ———: Amplitude α_1 von System I. Unterbrochene Kurve — — —: Amplitude α_2 von System II. Abszissen: Erregungsfrequenz ν.

J_1 und J_2 oder vielmehr der Kurven $\sqrt{J_1}$ (ausgezogen) und $\sqrt{J_2}$ (unterbrochene Linie), die in dem dargestellten engen Bereich um die Resonanzstellen herum mit den Amplituden α_1 und α_2 identisch sind. Die Intensitätskurven selbst lassen sich in dem hier erforderlichen kleinen Maßstab für das gewählte Beispiel nicht deutlich genug abbilden. Als Eigenfrequenzen der ungekoppelten Systeme sind die Werte $(\omega_1)_0 = 202$, $(\omega_2)_0 = 200$ angenommen, als Koppelungsparameter $K = \sqrt{\vartheta_1\,\vartheta_2}$ der ziemlich hohe Wert 0,05. Die Resonanzfrequenzen sind dementsprechend $(\omega_a)_0 = 206{,}1$ und $(\omega_b)_0 = 195{,}8$, die Frequenzen für die Resonanzminima 200 und 201. Die Koppelungskoeffizienten ϑ_1 und ϑ_2 sind einander gleich gesetzt ($\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0{,}05$), d. h. die Massen beider Systeme sind (annähernd) gleich groß angenommen, wie aus der immer gültigen Beziehung $M_1(\omega_1)_0^2\vartheta_1 = M_2(\omega_2)_0^2\vartheta_2$ folgt. Daher kommt es, daß auch beide Amplituden annähernd gleich sind. Sind die Massen verschieden, so stehen die Amplituden im umgekehrten Verhältnis der Quadratwurzeln aus den Massen, die Amplitude ist also für das leichtere System größer. Man kann dies benutzen, um erzwungene Schwingungen von sehr kleiner Amplitude sichtbar zu machen, indem man mit dem betreffenden (einfachen) System ein anderes gleich gestimmtes, viel leichteres koppelt, z. B. an eine schwere Stimmgabel, die nicht sichtbar reagiert, eine leichte, auf ihren Ton abgestimmte Blattfeder anheftet. Diese kommt dabei in heftige Schwingungen.

Da die Dämpfung vernachlässigt worden ist, sind beide Resonanzmaxima der Intensität unendlich groß. In Wirklichkeit bleiben sie immer endlich, weil stets eine, wenn auch geringe, Dämpfung vorhanden ist. Für solche der Wirklichkeit besser angepaßte gedämpfte Systeme wird die Lage der Maxima und Minima eine etwas andere, d. h. die Resonanzfrequenzen weichen etwas von den Werten $(\omega_a)_0$ und $(\omega_b)_0$ ab. Der Verlauf der Kurven ist aber im allgemeinen derselbe. Die Intensität J_1 und J_2 wächst mit wachsender Frequenz vom Werte 0 (für $\nu = 0$) zu einem ersten Maximum in der Nähe der kleineren Eigenfrequenz des gekoppelten Systems; fällt dann zu einem Minimum, das im primären System nahezu Null ist, steigt zu einem zweiten Maximum in der Nähe der

größeren Eigenfrequenz und fällt dann auf den Wert Null herab, der für $\nu = \infty$ erreicht wird.

Die Resonanzkurven behalten ihre charakteristische Gestalt mit den zwei Maxima auch für den Fall der Abstimmung der beiden Teilsysteme aufeinander, d. h. wenn $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ist. Ein solches Koppelungssystem besitzt ja (vgl. den Artikel „Schwingende Systeme") ebenfalls zwei Hauptschwingungen mit zwei verschiedenen Eigenfrequenzen ω_a und ω_b, die zu beiden Seiten der ungekoppelten Eigenfrequenz ω liegen; diesen entsprechen die zwei Resonanzmaxima. Wird aber die Dämpfung größer und größer, so kommt schließlich ein Punkt, wo die beiden Eigenperioden in eine einzige übergehen. Dementsprechend fallen bei sehr starker Dämpfung schließlich auch die beiden Maxima der Resonanzkurve in ein einziges zusammen. Das braucht jedoch nicht für beide Teilsysteme zugleich stattzufinden. Ob und wann das eine oder andere eintritt, hängt von dem Größenverhältnis der Dämpfungen δ_1 und δ_2 und der Koppelung $\sqrt{\vartheta_1\vartheta_2(\omega_1)_0(\omega_2)_0}$ ab. Für vier verschiedene Fälle hat M. Wien die Resonanzkurven der Amplituden α_1 und α_2 in der Umgebung der Resonanzstelle berechnet und gezeichnet. Diese Kurven sind in den Figuren 6 bis 9 hier wiedergegeben; sie veranschaulichen besser als Worte die Sachlage. Es sind aufeinander abgestimmte

Fig. 6. Starke, in beiden Systemen gleiche Dämpfung: nur je ein Maximum der Amplituden.

Fig. 7. Mittlere, in beiden Systemen gleiche Dämpfung: α_1 hat zwei, α_2 nur ein Maximum.

Fig. 8. System I mäßig, II schwachgedämpft: α_1 und α_2 haben je zwei Maxima, α_1 ein tiefes Minimum.

Fig. 9. System I schwach, II mäßig gedämpft: α_1 und α_2 haben je zwei Maxima, α_1 relativ hohe. Abszissen: Differenz η der Erregungs- und Eigenfrequenz (ν und ω_0) in Bruchteilen der letzteren. Aus M. Wien, Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie 61 (1897), 151.

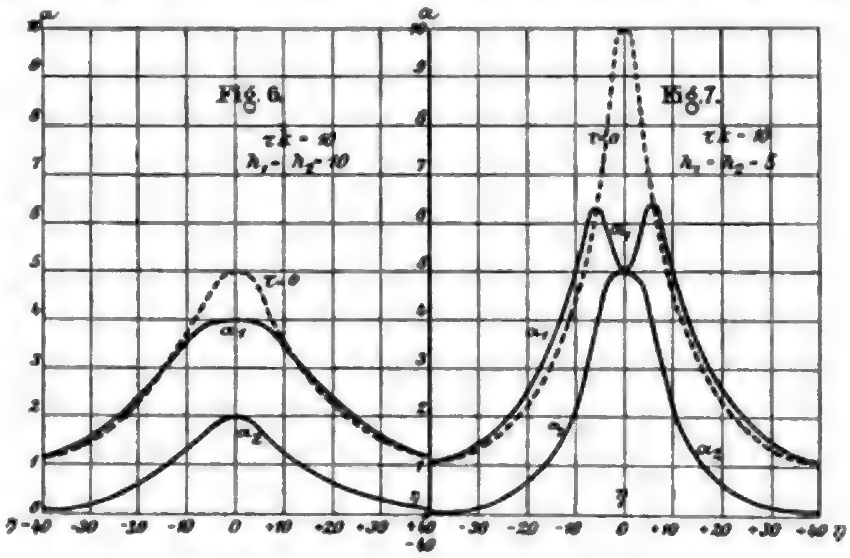


Fig. 6. Fig. 7.

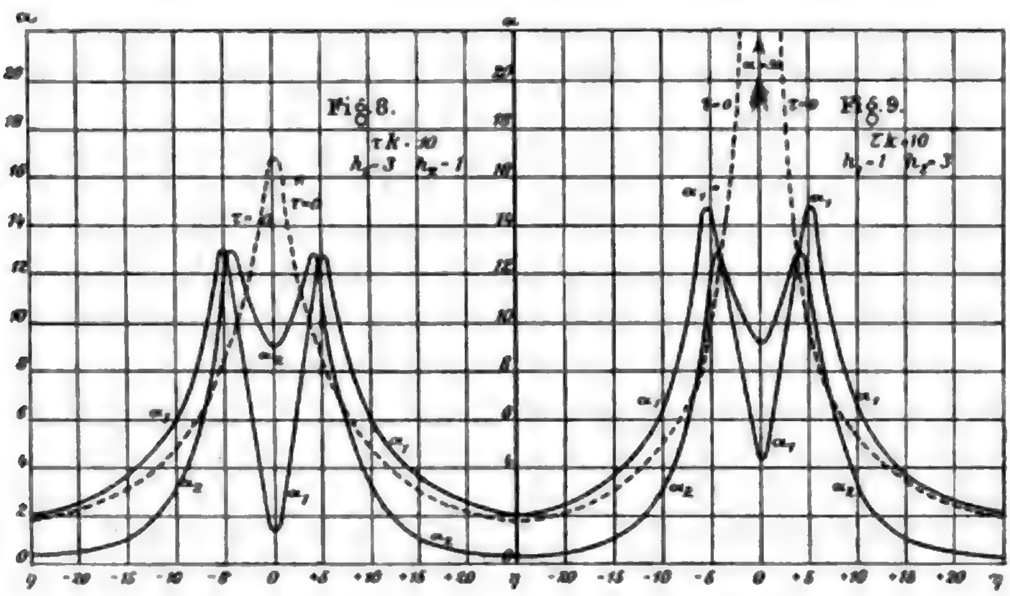


Fig. 8. Fig. 9.

Fig. 6 bis 9. Resonanzkurven der Amplitude α_1 und α_2 zweier gedämpfter aufeinander abgestimmter und gekoppelter Systeme bei gleicher Koppelung, aber verschiedenen Werten der Dämpfung.

Teilsysteme $(\omega_1)_0 = (\omega_2)_0 = \omega_0$) angenommen. Abszisse ist die Differenz η zwischen dieser Frequenz ω_0 und der Erregungsfrequenz ν in Bruchteilen der Frequenz ω_0 ausgedrückt, d. h. die Verstimmung gegen den Einklang; mit τk ist die oben als $\sqrt{\vartheta_1 \vartheta_2 (\omega_1)_0 (\omega_2)_0}$ bezeichnete Koppelung bezeichnet, h_1 und h_2 sind die Dämpfungen δ_1 und δ_2. Die Resonanzkurve für verschwindende Koppelung ($\tau = 0$) d. h. für die freien Systeme ist punktiert gezeichnet. Beschleunigungs- oder Reibungskoppelung anstatt der Kraftkoppelung gibt

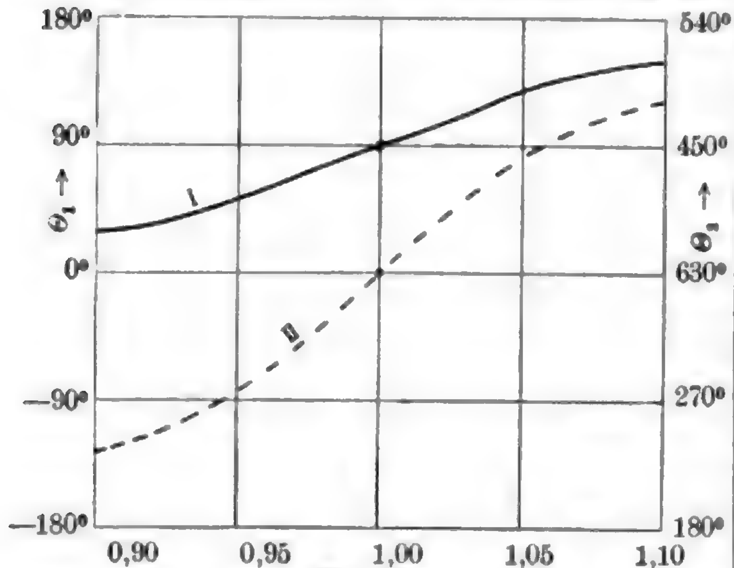


Fig. 10.

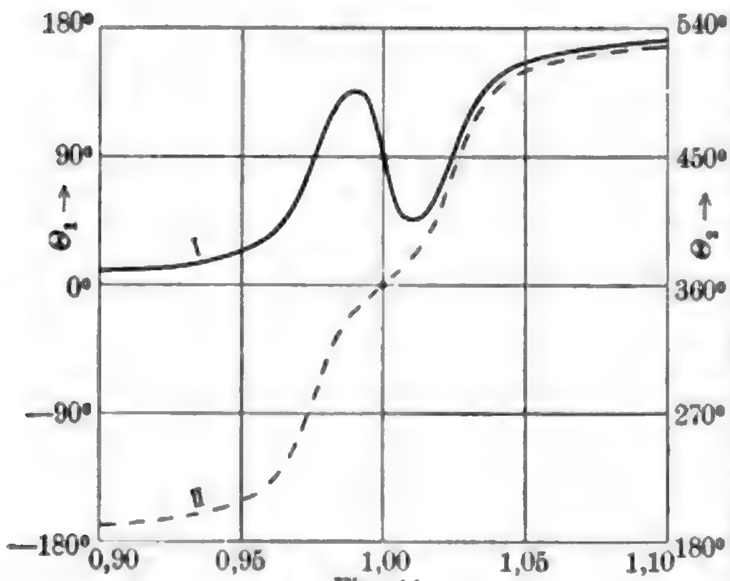


Fig. 11

Fig. 10 und 11. Phasendifferenz ungedämpfter erzwungener Schwingungen zweier abgestimmter gekoppelter Systeme bei verschiedener Eigendämpfung. Figur 10: starke, in beiden Systemen gleiche Dämpfung wie bei Figur 6. Figur 11: System I schwach, II mäßig gedämpft wie bei Figur 9. Abszissen: Frequenzverhältnis (Verstimmung) $\frac{\nu}{\omega_0}$. Ordinaten: Phasendifferenz Θ_1 (Kurve I, Maßstab links) und Θ_2 (Kurve II, Maßstab rechts) gegen die Phase der erregenden Kraft.

qualitativ dasselbe. Die quantitativen Unterschiede sind zu vernachlässigen, wenn der Koppelungskoeffizient genügend klein ist gegen den Wert Eins.

Sind in dem gekoppelten System mehr als zwei Teilsysteme vereinigt, so erhält man entsprechend mehr Eigenfrequenzen, im allgemeinen soviel wie Freiheitsgrade vorhanden sind. Ebensoviel Resonanzfrequenzen und Resonanzmaxima ergeben sich für die erzwungenen Schwingungen. Die Rechnungen werden aber komplizierter als bei zwei Teilsystemen. Für unendlich viele, regelmäßig in Gestalt von Raumgittern angeordnete Massenpunkte (Moleküle) sind in neuester Zeit von Born und v. Kármán, Madelung u. a. (Physik. Zeitschr. Bd. 13, 1912). Untersuchungen angestellt worden, welche das Verhalten solcher Systeme unter dem Einfluß periodischer Kräfte betreffen, wie sie beim Durchgang von Wellenbewegungen durch das Gitter entstehen.

10. Phasenverschiebung und Energieverteilung zwischen den Teilsystemen. Die Phasenverschiebung der erzwungenen Schwingung gegen die erregende Kraft ist in beiden Teilsystemen verschieden groß und außerdem noch mit der Frequenz ν variabel. Daher ist auch der Phasenunterschied der beiden Teilsysteme gegeneinander von der Frequenz der Erregung abhängig. Er ist bei nicht sehr starker Dämpfung fast im ganzen Bereich der möglichen Frequenzen, d. h. von $\nu = 0$ bis $\nu = \infty$, entweder nahezu Null oder nahezu 180°. Nur in unmittelbarer Umgebung der Resonanzstellen ändert er sich und nimmt Werte an, die um 90° herumliegen. An den Resonanzstellen selbst — genauer an der Stelle $\nu = \omega_0$ — beträgt er 90°. Denselben Wert (90°) hat auch die Phasenverschiebung gegen die erregende Kraft an den Resonanzstellen, während sie für andere Frequenzen nahezu Null bzw. 180° ist. Der Gang der Phasenverschiebungen ist in Figur 10 und 11 für zwei verschiedene Systeme dargestellt. Das erste ist sehr stark gedämpft (beide Teilsysteme haben darin die gleiche Dämpfung $\delta_1 = \delta_2 = 10$); das andere ist mäßig gedämpft (die Dämpfungen der Teilsysteme sind verschieden angenommen, $\delta_1 = 3$, $\delta_2 = 1$). Alle Teilsysteme haben ungekoppelt die gleiche (ungedämpfte) Frequenz $\omega_0 = 200$, es sind also abgestimmte Systeme. Als Abszisse ist das Verstimmungsintervall $\frac{\nu}{\omega_0}$, als Ordinate die Phasenverschiebung Θ_1 und Θ_2 der Teilsysteme gegen die erregende Kraft in Bogengraden aufgetragen. Für $\frac{\nu}{\omega_0} = 0$ sind in beiden Fällen die Phasenverschiebungen $\Theta_1 = 0$, $\Theta_2 = 180°$; für $\frac{\nu}{\omega_0} = \infty$ sind sie $\Theta_1 = 180°$, $\Theta_2 = 180° + 360° = 540°$. Dazwischen steigen sie im

ersten Fall (bei starker Dämpfung) ziemlich gleichmäßig, im zweiten Fall (bei mäßiger Dämpfung) dagegen nur in der nächsten Umgebung der Resonanzstelle ziemlich plötzlich von dem Anfangswert auf den Endwert mit einer eigentümlichen Schwankung an der Resonanzstelle $\nu = \omega_0$.

Mit dem Phasenunterschiede hängt aufs engste die Verteilung der Energie auf die Teilsysteme zusammen. Da die Bewegung einfach pendelförmig d. h. sinusförmig periodisch ist, so ist die Geschwindigkeit des betreffenden Punktes am größten, wenn seine Elongation gleich Null ist; seine Geschwindigkeit am kleinsten, nämlich gleich Null, wenn die Elongation am größten ist. Geschwindigkeit und Elongation aus der Ruhelage sind einander zugeordnet wie Sinus- und Cosinusfunktion desselben Winkels, haben also eine Phasendifferenz von 90° gegeneinander. Wenn nun die Schwingung, d. h. die Verschiebung x des Punktes aus der Ruhelage eine Phasendifferenz von 90° gegen die wirkende Kraft besitzt, so ist die Kraft offenbar in gleicher (oder entgegengesetzter, um 180° verschiedener) Phase mit der Geschwindigkeit. Daher wird die von der Kraft an dem schwingenden Punkte geleistete, d. h. die auf ihn übertragene (oder von ihm abgegebene) Arbeit ein Maximum, wenn die Phasendifferenz zwischen Kraft und Elongation 90° beträgt. Das ist im Resonanzfall erfüllt. In diesem findet stets der größte Energieumsatz statt.

Wirkt nun bei einem gekoppelten System die erregende Schwingung nur auf das eine, primäre, Schwingungssystem, so nimmt dieses zunächst die Energie von der erregenden Schwingung auf und kommt in Schwingung. Am meisten Energie würde es im Resonanzfall, also bei einer Phasendifferenz von 90° aufnehmen und dabei in stärkste Schwingung geraten, wenn es nicht gekoppelt wäre. Infolge der Koppelung gibt es aber an das andere, das sekundäre Teilsystem Energie ab; es übt auf dieses eine periodische, mit der Verschiebung x von System 1 in gleicher Phase befindliche Kraft aus und versetzt damit das Sekundärsystem in Schwingung. Ist nun die Phasendifferenz zwischen den beiden Teilsystemen 90°, was im Resonanzfall eintritt, so ist auch die Energieabgabe ein Maximum, weil wieder die Kraft mit der Geschwindigkeit (von System 2) in gleicher, bezw. entgegengesetzter Phase ist. Die von System 1 aufgenommene Energie wird also sofort weitergegeben. Der Erfolg ist der, daß das primäre System nur in schwache Schwingungen gerät, obwohl unter Umständen viel Energie durch dasselbe hindurchwandert. Die in der Zeiteinheit hindurchgehende Energie wird, wenn der stationäre Zustand erreicht ist, durch Reibung usw. im zweiten und teilweise auch schon im ersten System in andere Energieformen umgewandelt. Was hier für die Kraftkoppelung gesagt ist, gilt ohne wesentliche Aenderung auch für Beschleunigungs- und Reibungskoppelung.

11. Dämpfung der erzwungenen Schwingung durch Koppelung mit einem isochronen System. Schlingertank. Ein Beispiel für die Verringerung, ja Vernichtung der schwingenden Bewegung durch Koppelung mit einem anderen isochron gestimmten System bietet der Frahmsche Schlingertank. Um die Rollbewegungen eines Schiffes, die ja erzwungene Schwingungen infolge der periodischen Stöße der das Schiff treffenden Wasserwellen sind, zu dämpfen und besonders, um die gefährlich großen Amplituden derselben zu verkleinern, die infolge Resonanz bei Gleichheit der Schiffseigenschwingungsdauer mit der Schwingungsdauer der Wellen auftreten zu können, wird nach Frahm ein schmaler flacher oben geschlossener Tank in das Schiff eingebaut,

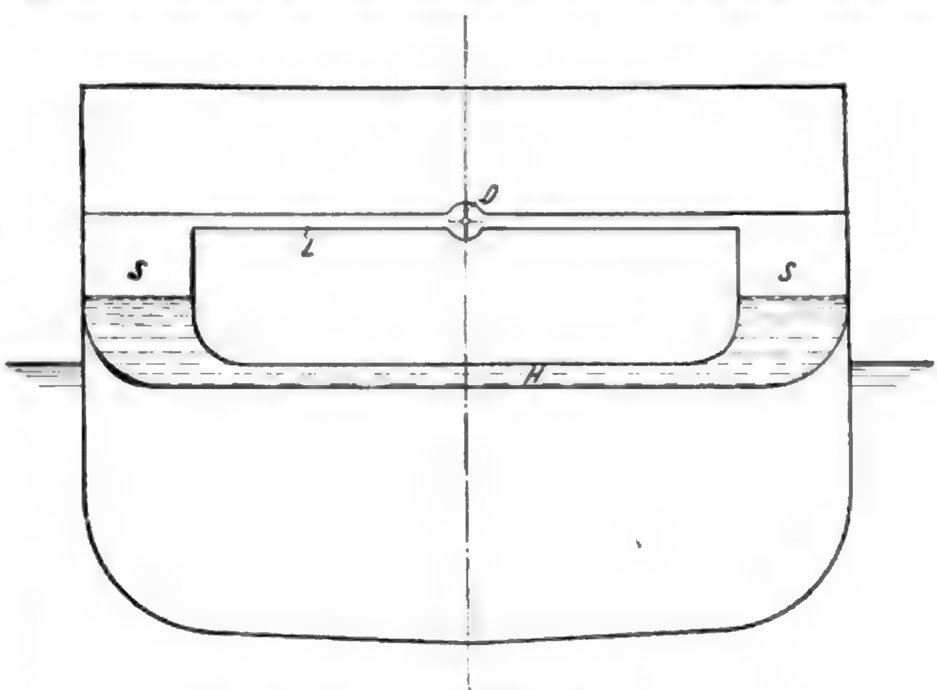


Fig. 12a. Schlingertank nach Frahm.

dessen Längsrichtung quer zur Schiffsachse liegt und der zum Teil mit Flüssigkeit (Wasser) gefüllt ist. Sein Längsschnitt hat die Form eines Systems zweier kommunizierender Röhren (vgl. Fig. 12a) mit vertikalen Seitenschenkeln SS und dem horizontalen Verbindungsrohr H. Die Flüssigkeit pendelt in dem Tank bei den Rollbewegungen des Schiffes von einer Seite zur anderen. Die Dimensionen können so gewählt werden, daß die Eigenperiode dieser Schwingungen gleich der Eigenperiode der Schiffsschwingungen ist. Wirken nun Wellen mit der gleichen Periode auf das Schiff, so gerät nicht das Schiff als primäres Schwingungssystem, sondern die Flüssigkeit im Tank als mit dem Schiff gekoppeltes sekundäres System in heftige Pendelungen, die aber wegen der Reibung der Tankflüssigkeit und der Reibung der oben durch das Drosselventil D hindurchgepreßten, vom Wasser verdrängten Luft stark gedämpft werden. Die von den Wellen übertragene Energie wird daher unschädlich gemacht. Bei anderer Frequenz der Wellen ist die beruhigende Wirkung des Tanks geringer. Natürlich wirkt der Tank infolge der Koppelung auch dämpfend auf die Eigenschwingungen des Schiffes, besonders wenn die Tankwasserschwingungen durch irgendwelche Widerstände stark gedämpft werden. Die zwischen Schiff und Tankflüssigkeit wirkende Koppelung ist hier zum Teil Reibungskoppelung, zum Teil Kraftkoppelung. Zur Demonstration dieser Wirkungen eignet sich das von Oberbeck zuerst angegebene, von M. Wien verbesserte Doppelpendel, wenn man das sekundäre Pendel desselben durch ein um eine horizontale Achse drehbares U-Rohr als Pendelkörper ersetzt, das zum Teil mit Flüssigkeit (Wasser) gefüllt ist (Figur 12b). Sind die Schenkel offen, so kann die Flüssigkeit zwischen den beiden Schenkeln hin- und herschwingen. Diese Schwingungen sind durch Reibung stark gedämpft. Werden die Schenkel geschlossen, so kann die Flüssigkeit nur mit dem U-Rohr zusammen als Ganzes schwingen. Die Dimensionen werden so gewählt, daß beide Arten von Schwingungen gleiche Periode haben. Wird nun das primäre Pendel auf dieselbe Periode abgestimmt und mit dem U-Rohr durch einen elastischen Faden oder eine Spiralfedergekoppelt, so schwingt dieses heftig mit, wenn die Schenkel geschlossen sind; dagegen bleibt das Rohr fast in Ruhe und nur die Flüssigkeit schwingt, wenn die Schenkel geöffnet werden. Das primäre Pendel muß hierbei sehr viel größere Masse haben als das U-Rohr, damit seine Schwingung nicht merklich durch die hier unvermeidliche Rückwirkung gestört wird. Ein solcher Apparat ist von M. Wien sowie von Lummer und Waetzmann konstruiert. Die Abbildung Figur 12b ist der Veröffentlichung der Letztgenannten (Physikal. Zeitschrift **12** S. 1135. 1911) entnommen.

III. Elektromagnetische Schwingungen.

12. Energie und Schwingungsgleichungen elektromagnetischer Systeme im allgemeinen. Den Schwingungen von einzelnen Massenpunkten und Punktsystemen schließen sich die Schwingungen elektromagnetischer Systeme mit quasistationärer

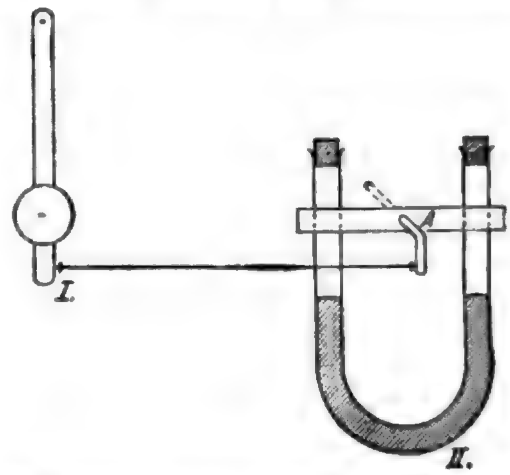


Fig. 12b. Doppelpendel mit U-Rohr.

Strömung unmittelbar an. Dieselben Gleichungen, die dort nur bei unendlich kleinen Verschiebungen richtig sind, gelten hier streng auch für endliche Werte der Verschiebungen, d. h. Koordinatenänderungen. Die Koordinaten sind hier je nach Wahl die elektrischen Spannungen an den in die Kreise eingeschalteten Kondensatoren, oder die elektrischen Stromstärken oder Elektrizitätsmengen (Ladungen der Kondensatoren), welche Größen sich sämtlich periodisch ändern.

Quasistationär ist die Strömung, wenn die Wellenlänge λ der Schwingung, d. h. der Quotient aus Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Störung und sekundlicher Schwingungszahl (Frequenz) $\lambda = \frac{c}{n}$ groß ist gegen sämtliche Längendimensionen des Schwingungskreises. Ob in einem gegebenen Fall quasistationäre Strömung anzunehmen ist oder nicht, hängt also von der Frequenz der Erregung ab.

Wegen des großen Wertes von c, der gleich der Lichtgeschwindigkeit (300000 km/sec oder $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec) ist, wird λ erst für sehr große Frequenzen so klein, daß die Längendimensionen der angewandten Apparate nicht mehr als klein gelten können. Gleich 100 m wird z. B. die Wellenlänge elektrischer Schwingungen erst bei einer sekundlichen Frequenz von $3 \cdot 10^6$ (3 Millionen). Bis zu Frequenzen von etwa 30000 und häufig noch darüber hinaus kann also in allen Leitungen von weniger als 100 m größter Ausdehnung unbedingt quasistationäre Strömung

angenommen werden. Bei technischen Wechselströmen mit der Sekundenfrequenz 50 ist die zugehörige Wellenlänge 6.10^8 cm oder 6000 km. Für diese Frequenz kann man im allgemeinen in allen uns zu Gebote stehenden elektrischen Schwingungssystemen quasistationäre Strömung annehmen. Eine Mittelstellung nehmen die in der Telephonie maßgebenden Frequenzen ein, die um etwa 1000 pro Sekunde liegen, zumal da hierbei recht lange Leitungen von mehreren hundert Kilometern u. dgl. vorkommen. Aber auch für Schwingungen, bei denen die Ströme nicht mehr quasistationär sind, geben die Gleichungen der quasistationären Schwingungen annähernd richtige Resultate. Diese Erweiterung des Geltungsbereiches läßt sich z. B. für die Antennen der drahtlosen Telegraphie verwerten, deren Dimensionen oft von derselben Größenordnung sind wie die Wellenlänge der ihnen aufgezwungenen und von ihnen ausgesandten Schwingungen.

Das typische Beispiel eines Schwingungskreises mit quasistationärer Strömung ist der Kondensatorkreis, ein nahezu geschlossener Leiterring, dessen Kapazität wesentlich in dem eingeschalteten Kondensator lokalisiert ist (vgl. Fig. 13). Auch die Selbstinduktion kann an einer oder mehreren Stellen lokalisiert sein (eingeschaltete Spulen). In dem Schließungsdraht dessen Kapazität (und Selbstinduktion) zu vernachlässigen ist, fließt ein quasistationärer Strom.

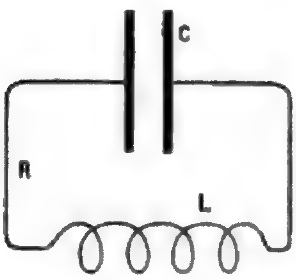


Fig. 13. Nahezu geschlossener Schwingungskreis (Kondensatorkreis) mit Kapazität C, Selbstinduktion L und Ohmschem Widerstand R.

Selbstinduktion und Kapazität treten hier an die Stelle der Massenträgheit und der Direktionskraft mechanischer Systeme, und zwar entspricht der Masse der Selbstinduktionskoeffizient L, der Direktionskraft D die reziproke Kapazität $\frac{1}{C}$ (vgl. auch den Artikel „Schwingende Bewegungen"). An Stelle der örtlichen Verschiebung x der Massenpunkte tritt die elektrische Spannung V, die Geschwindigkeit der Bewegung $\frac{dx}{dt}$ wird der elektrischen Stromstärke J proportional. Der kinetischen Energie U entspricht die magnetische Energie der elektrischen Strömung, der potentiellen W die elektrische Energie der Ladungen, der Zerstreuungsfunktion 2F die Joulesche Wärme. Diese drei Größen werden demgemäß

$$(38)\quad \begin{cases} U = \frac{L_1}{2} J_1^2 + \frac{L_2}{2} J_2^2 + \ldots \\ \quad + L_{12} J_1 J_2 + L_{13} J_1 J_3 + \ldots \\ F = \frac{R_1}{2} J_1^2 + \frac{R_2}{2} J_2^2 + \ldots \\ W = \frac{C_1}{2} V_1^2 + \frac{C_2}{2} V_2^2 + \ldots \end{cases}$$

wobei die (Entladungs-)Stromstärken mit den Spannungen verbunden sind durch die Gleichungen $J_1 = -C_1 \frac{dV_1}{dt}$, $J_2 = -C_2 \frac{dV_2}{dt}$ usw. Die Bedeutung der Größen ist: $L_1, L_2 \ldots$ Koeffizienten der Selbstinduktion der einzelnen Schwingungskreise, L_{12} Koeffizient der wechselseitigen Induktion der Kreise 1 und 2 usw.; $R_1, R_2 \ldots$ die Ohmschen Widerstände, $C_1, C_2 \ldots$ die Kapazitäten der Kreise. Um dem allgemeinen Gleichungssystem (32) ganz zu entsprechen, müßte man noch wechselseitige Widerstands- und Kapazitätskoeffizienten und ihnen entsprechende Glieder in (38) einführen. Der durch (38) realisierte Fall, in dem diese Ergänzungsglieder fehlen, ist der Fall induktiv (magnetisch) gekoppelter Kreise. Er ist der wichtigste und der am einwandfreiesten zu behandelnde.

Mittels der Energiewerte (38) lassen sich die Differentialgleichungen der Schwingungen genau wie bei mechanischen Systemen aus den Lagrangeschen Gleichungen (31), die hier ebenfalls gelten, ableiten, indem man $x_1, x_2 \ldots$ durch $V_1, V_2 \ldots$ ersetzt. Die einzelnen Glieder der Lagrangeschen Gleichung haben die Dimension einer elektrischen Spannung multipliziert mit der Kapazität des betreffender Schwingungssystems. Die äußeren „Kräfte" X_i sind also auch elektrische Spannungen multipliziert mit der betreffenden Kapazität. Dividiert man diese Kapazitäten weg, so ergeben sich die Gleichungen der erzwungenen Schwingungen

$$(39)\quad \begin{cases} L_1 C_1 \frac{d^2 V_1}{dt^2} + R_1 C_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 + L_{12} C_2 \frac{d^2 V_2}{dt^2} \\ \quad + L_{13} C_3 \frac{d^2 V_3}{dt^2} + \ldots = V_1^{(e)} \\ L_2 C_2 \frac{d^2 V_2}{dt^2} + R_2 C_2 \frac{dV_2}{dt} + V_2 + L_{21} C_1 \frac{d^2 V_1}{dt^2} \\ \quad + L_{23} C_3 \frac{d^2 V_3}{dt^2} + \ldots = V_2^{(e)} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \end{cases}$$

Hier sind $V_1^{(e)}, V_2^{(e)} \ldots$ die äußeren oder eingeprägten elektromotorischen Kräfte (Spannungen), welche auf irgendeine Weise, z. B. durch Induktion, auf den betreffenden Kreis wirken. Es sind nur magnetische Koppelungsglieder vorhanden, entsprechend der Beschleunigungskoppelung der mechanischen Systeme.

Die Gleichungen lassen sich auch auf Grund der bekannten Gesetze der elektrischen Strömung

direkt ableiten: denn sie drücken nur das Gesetz aus, daß die von außen wirkende Spannung gleich der Summe der inneren Spannungen (elektromotorischen Kräfte) sein muß.

Statt der magnetischen Koppelungsglieder oder zu ihnen hinzutretend können noch Glieder mit Widerstandskoppelung und mit elektrischer Koppelung auftreten, erstere den Stromstärken $J = -C\frac{dV}{dt}$, letztere den Spannungen V selbst proportional. In diesen Fällen müssen dann aber die Energieausdrücke (38) durch Hinzufügung neuer Glieder ergänzt werden.

Die Form der Gleichungen (39) zeigt, daß hier für die erzwungenen Schwingungen genau dieselben Gesetze gelten, die im vorhergehenden für mechanische Schwingungssysteme kurz entwickelt worden sind. Der einzige, aber für das Ergebnis nicht wesentliche, Unterschied liegt in der Koppelungsart, die der Beschleunigungskoppelung äquivalent ist, während die mechanischen Systeme für Kraftkoppelung behandelt wurden.

13. Erzwungene Schwingungen eines Leiters mit Selbstinduktion und Kapazität. Resonanz. In den Gleichungen (39) ist auch der Fall des ungekoppelten freien Schwingungskreises, auf den von außen eine periodische elektromotorische Kraft wirkt, mit enthalten; man hat dafür nur die Koppelungsglieder wegzulassen. Für einen irgendwie gestalteten einfachen linearen Leiter, der mit Selbstinduktion L, lokalisierter Kapazität C und Ohmschem Widerstand R versehen ist, z. B. eine Spule, die mit einem Kondensator hintereinander geschaltet ist (vgl. Fig. 14), ergibt sich somit die auch

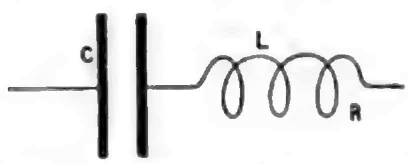


Fig. 14. Offener Schwingungskreis.

leicht direkt aus dem Ohmschen Gesetz abzuleitende Differentialgleichung

$$(40)\qquad LC\frac{d^2V}{dt^2} + RC\frac{dV}{dt} + V = V^{(e)}$$

Ist die an den Endpunkten des betrachteten Leiterstückes wirkende eingeprägte elektromotorische Kraft sinusförmig

$$(41)\qquad V^{(e)} = V^{(e)}_{max} \sin \omega t$$

so wird die am Kondensator, d. h. zwischen den Kondensatorplatten vorhandene Spannungsdifferenz

$$(42)\ V = \frac{V^{(e)}_{max}}{\sqrt{\omega^2C^2R^2 + (1-\omega^2LC)^2}} \sin(\omega t - \Theta)$$

$$= \frac{V^{(e)}_{max}}{\omega C\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \sin(\omega t - \Theta)$$

und die Ladestromstärke des Kondensators

$$(43)\qquad J = C\frac{dV}{dt} =$$

$$\frac{V^{(e)}_{max}}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}} \cos(\omega t - \Theta)$$

Die Phasenverzögerung Θ ist bestimmt durch

$$(44)\qquad \operatorname{tg} \Theta = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}.$$

Θ liegt zwischen 0° und + 180°, im ersten oder zweiten Quadranten. Die Kondensatorspannung ist also gegen die äußere Spannung immer in der Phase zurück, und zwar um so mehr, je größer der Ohmsche Widerstand R ist. Die Ladestromstärke des Kondensators eilt der Kondensatorspannung um 90° vor, da der Cosinus dem Sinus desselben Winkels um diesen Betrag voreilt; gegen die äußere Spannung eilt sie also um 90°—Θ vor, ist ihr somit je nach der Größe von Θ voraus oder hinter ihr zurück (vgl. Fig. 15, in der Θ = 40° angenommen ist, und die schwach ausgezogene Kurve die äußere oder eingeprägte elektromotorische Kraft, $V^{(e)}$, die stark ausgezogene die Kondensatorspannung V, die gestrichelte Kurve die Ladestromstärke J darstellt).

Aus dem allgemeinen Fall eines mit Selbstinduktion und Kapazität behafteten Leiters ergeben sich sofort die besonderen des nur Kapazität oder nur Selbstinduktion außer dem Widerstand enthaltenden Leiters. Im ersten Fall ist L=0, im zweiten C=∞ zu setzen, denn eine unendlich große Kapazität wirkt bei Wechselstrom wie eine metallische Ueberbrückung des Dielektrikums mit verschwindend kleinem Widerstand. Ist nur Kapazität vorhanden, so eilt der (Lade-) Strom der äußeren Spannung vor, bei verschwindend kleinem Widerstand um 90°. Ist nur Selbstinduktion vorhanden, so bleibt der Strom hinter der äußeren Spannung zurück, bei verschwindend kleinem Widerstand um 90°.

Die Stromamplitude wird um so größer, je kleiner der Nenner in (43) wird, in Uebereinstimmung mit dem Verhalten der Schwingungsamplitude bei mechanischen Systemen. Sie nimmt also im allgemeinen mit wachsender Kapazität und fallender Selbstinduktion zu, indem der „scheinbare Widerstand" $\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}$ kleiner wird. Sein Minimalwert, der gleich dem reinen Ohmschen Widerstand R ist, wird bei Wegfall der Kondensatorkapazität und der Selbstinduktion erreicht. Der scheinbare Widerstand kann aber auch bei vorhandener Selbstinduktion und Kapazität auf diesen Wert sinken, wenn nämlich $\frac{1}{\omega C} - \omega L = 0$, d. h.

$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ist. Für diese mit den Konstanten des Leiters variierende Frequenz kompensieren sich die Wirkungen von Selbstinduktion und Kapazität. Man spricht in diesem Falle von **Resonanz** des Stromkreises mit der eingeprägten elektromotorischen Kraft. Denn die (Kreis-)Frequenz ω der Erregung ist dabei gleich der Frequenz der Eigenschwingungen des aus hintereinandergeschalteter Selbstinduktion und Kapazität bestehenden elektrischen Schwingungskreises, wenn man den Widerstand desselben und die dadurch entstehende Dämpfung vernachlässigt. Die Gleichung der Eigenschwingungen ergibt sich aus (40) indem man $V^{(e)} = 0$ setzt, und man erkennt sofort, daß $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ die Eigenfrequenz bei verschwindender Dämpfung $(\delta = \frac{R}{2L} = o)$ ist. (Vgl. auch den Artikel „Schwingende Bewegung".)

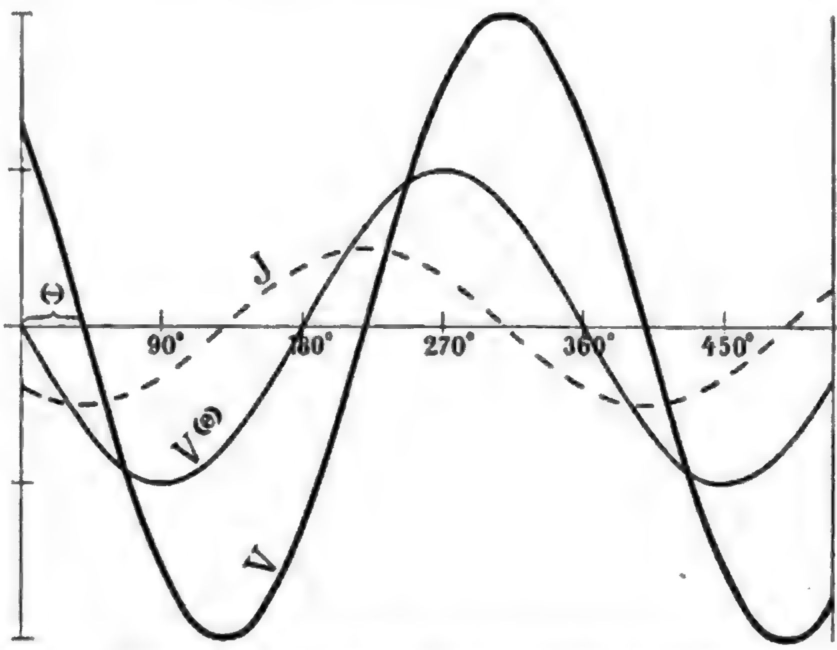


Fig. 15. Phasenverschiebung zwischen eingeprägter elektromotorischer Kraft $V^{(e)}$ (——), Kondensatorspannung V (——) und Ladestrom J (— — —). Abszissen: Phase der eingeprägten EMK in Bogengraden. Ordinaten: Werte der Spannung bezw. Stromstärke.

Die Strom- und Spannungsamplituden steigen an der Resonanzstelle stark an und können gefährliche Höhe erreichen, besonders, wenn der Ohmsche Widerstand klein ist. Durchschlagen der Isolation oder übermäßige Erwärmung des in Resonanz befindlichen Leiters können auftreten und unter Umständen zur Zerstörung von Kabeln in Leitungsnetzen usw. führen.

Man sucht daher in Wechselstromnetzen nach Möglichkeit die Resonanz zu vermeiden. Bei kleiner Frequenz ist das nicht schwer, da hierbei L und C sehr große Werte annehmen müssen, um die Resonanzbedingung zu erfüllen, und so große Kapazitäten und Selbstinduktionen nur selten praktisch benutzt werden. Für größere Frequenzen kann leichter Resonanz auftreten; z. B. für die in der Telephonie vorzugsweise in Betracht kommenden Frequenzen, die als Oberschwingungen in dem die Leitung passierenden Strom enthalten sind. Die Folge ist eine vorzugsweise Verstärkung dieser Oberschwingungen und damit eine Verzerrung der Wellenform und der Lautübertragung. Dieselbe Verzerrung der Schwingungsform tritt bei technischen Wechselströmen ein, wenn dieselben Oberschwingungen enthalten, also nicht rein sinusförmig sind. Für den Betrieb mit Transformatoren usw. kann dies in Betracht kommen. Ueber Fälle, wo gerade die verstärkende Wirkung der Resonanz benutzt wird, vgl. weiter unten.

Die erzwungenen Schwingungen gekoppelter elektromagnetischer Schwingungssysteme bieten gegenüber den früher besprochenen mechanischen Systemen theoretisch im Prinzip nichts Neues. Strom- und Spannungsamplituden verhalten sich wie die Amplituden (Maximalwerte) der Verschiebung und Geschwindigkeit, die Phasendifferenzen sind dieselben und die Resonanzkurven haben den gleichen Verlauf.

IV. Erzwungene Schwingungen elastischer Körper.

14. Allgemeines. Bedeutung der erzwungenen Schwingungen für den dynamischen Ausbau der Festigkeitslehre und Kinematik. Erzwungene Schwingungen von elastischen Körpern kommen in der Natur außerordentlich häufig vor und sind besonders für die Technik von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Im Maschinengetriebe sind gewisse Teile dauernd periodischen Kräften unterworfen; bei Bauwerken, insbesondere bei Brücken, können periodische Beanspruchungen auftreten. Bei der Festigkeitsberechnung der Bauteile ist auf diese dynamischen Beanspruchungen Rücksicht zu

nehmen, die unter Umständen weit größer werden können, als die statischen. Nach den allgemeinen, bei den Schwingungen der Punktsysteme besprochenen Prinzipien ist klar, daß die Schwingungsamplitude und damit die Beanspruchung der betreffenden Bauten bezw. Konstruktionsteile im allgemeinen nur bei Resonanz unzulässige Höhe erreichen wird. Da die Periode der erregenden Kraft immer als bekannt vorauszusetzen ist, so handelt es sich also in erster Linie darum, die Eigenschwingungsperiode bezw. -perioden der den Kräften unterliegenden Körper zu ermitteln, um festzustellen, ob etwa eine von ihnen der Erregungsperiode an Größe bedenklich nahekommt. Das geschieht in der Lehre von den freien oder Eigenschwingungen, auf die hier hinzuweisen ist (vgl. den Artikel „Schwingende Systeme"). Je nach der Gestalt und Befestigungsart des Körpers können aber verschiedene Typen von elastischen Schwingungen in Betracht kommen, und zwar gleichzeitig an demselben Körper. Der Umfang des Problems erweitert sich dadurch sehr. Nach anderer Richtung hin findet ebenfalls eine bedeutende Erweiterung statt, insofern nämlich, als nicht mehr nur Kräfte zu betrachten sind, die auf einzelne Punkte wirken, sondern auch Flächendrücke und Drehmomente, die auf mehr oder weniger ausgedehnte Teile des Körpers ausgeübt werden. Ihre Wirkung hinsichtlich der Erzeugung von Schwingungen kann je nach der Lage der Angriffsstelle sehr verschieden groß sein. Strenge Berechnung der erzwungenen Schwingungen von elastischen Körpern ist bisher in den meisten praktisch wichtigen Fällen unmöglich gewesen, man muß sich mit Annäherungen begnügen. Der dynamische Ausbau der Festigkeitslehre und Kinematik, der auf diesen Rechnungen beruht, ist daher erst in den Anfängen und läßt noch keine allgemeine Darstellung zu, die den Gegenstand theoretisch einigermaßen erschöpfend und richtig wiedergibt. Es muß genügen, einige besonders interessante Beispiele anzuführen. Soweit ruhende, d. h. als Ganzes ruhende Systeme wie Brücken usw. in Betracht kommen, können die rein physikalischen Untersuchungen über erzwungene Schwingungen einfacher elastischer Systeme wie Saiten, Stäbe usw. benutzt werden, von denen in diesem Zusammenhang ebenfalls die Rede sein wird. Doch sind die Ergebnisse auf die meist komplizierteren Verhältnisse der Technik nur mit Vorsicht zu übertragen.

15. Transversalschwingungen der beiderseits befestigten Saite, von der ein Punkt einer periodischen Kraft unterliegt. Die Differentialgleichungen der Bewegung lassen sich ebenso wie bei den Punktsystemen aus den Gleichungen der Eigenschwingungen durch Hinzufügung der äußeren Kräfte ableiten. Da in der Differentialgleichung die Bewegung eines beliebig herausgegriffenen Massenpunktes — eigentlich Massenelementes $\varrho d\tau = \mu$ — dargestellt wird, so sind die Glieder der Gleichung nichts anderes als die an diesem angreifenden Kräfte. Als äußere Kraft ist also in die Differentialgleichung der auf dieses Massenelement in der betreffenden Koordinatenrichtung entfallende Betrag der gesamten äußeren Kräfte einzuführen. Hieraus ersieht man, daß die (periodische) Zusatzkraft eine Funktion nicht nur der Zeit, sondern auch des Ortes ist. Die zu lösende Differentialgleichung, die an sich schon als partielle Gleichung mehr Schwierigkeiten bietet als die gewöhnlichen Differentialgleichungen der Punktsysteme, wird dadurch im allgemeinen noch komplizierter. Als einfachstes Beispiel sei hier der Fall einer mit der Kraft P, also der Spannung $p = \frac{P}{q}$ (q = Saitenquerschnitt) gespannten, beiderseits unnachgiebig befestigten Saite, angeführt, auf welche an einem Punkte $x = b$ — genauer an einem Saitenelement von der Länge dx — eine sinusförmig periodische Kraft $F \cos \nu t$ senkrecht zur Saitenrichtung wirkt. Diesem Fall steht der andere ebenso zu behandelnde gegenüber, daß dem Saitenpunkt b eine vorgeschriebene periodische Bewegung $y = \gamma \cos \nu t$ von außen aufgezwungen wird. Die Saite erstrecke sich von $x = 0$ bis $x = l$; die seitliche (transversale) Ausbiegung sei y. Wenn man eine der Geschwindigkeit proportionale Reibungskraft annimmt, welche die Dämpfung δ erzeugt, so ist die Differentialgleichung der Bewegung

$$(45) \qquad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -2\delta \frac{\partial y}{\partial t} + c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + Y;$$

c ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit transversaler Wellen auf der Saite. Y hat nur für die Stelle $x = b$ den Wert $F \cos \nu t$, an allen anderen Stellen aber den Wert 0. Zu realisieren ist eine solche auf einen Punkt, d. h. streng genommen auf eine verschwindend kurze Saitenstrecke konzentrierte Kraft etwa dadurch, daß an die Saite ein kleines leichtes Eisenstückchen angeklebt wird, auf welches ein von einem periodischen Strom durchflossener Elektromagnet wirkt. Ohne die äußere Kraft Y und ohne das Dämpfungsglied $2\delta \frac{\partial y}{\partial t}$ erhält man die bekannte Schwingungsgleichung der gespannten Saite, welche sinusförmige Eigenschwingungen mit den in harmonischer Reihe aufsteigenden Frequenzen

$(\omega_1)_0 = \frac{\pi c}{l}, (\omega_2)_0 = \frac{2\pi c}{l}, \ldots (\omega_k)_0 = \frac{k\pi c}{l}$ ergibt. Bei vorhandener Dämpfung gehen diese Werte in die kaum merklich von ihnen verschiedenen Werte $\omega_1 = \sqrt{(\omega_1)_0^2 - \delta^2}$ usw. über. Diese Eigenschwingungen lagern sich zu Beginn der Bewegung über die erzwungenen Schwingungen, deren Frequenz ν ist. Die erzwungene Schwingung wird nach der bei **Rayleigh** (Sound Bd. I § 133ff.) mitgeteilten Rechnung mit Vernachlässigung der Dämpfung (also $\delta = 0$ gesetzt)

$$(46)\quad \begin{cases} y = \frac{F}{P}\,\dfrac{\sin\frac{\nu x}{c}\sin\frac{\nu}{c}(l-b)}{\frac{\nu}{c}\sin\frac{\nu l}{c}}\cos\nu t \\ \text{von } x = o \text{ bis } x = l \\ y = \frac{F}{P}\,\dfrac{\sin\frac{\nu}{c}(l-x)\sin\frac{\nu b}{c}}{\frac{\nu}{c}\sin\frac{\nu l}{c}}\cos\nu t \\ \text{von } x = b \text{ bis } x = l \end{cases}$$

Ist das Problem so gestellt, daß nicht eine gegebene Kraft $F\cos\nu t$ auf einen Saitenpunkt wirkt, sondern daß diesem Punkt $(x = b)$ eine vorgeschriebene Bewegung $y = \gamma\cos\nu t$ aufgezwungen wird, so erhält man unter den gleichen Bedingungen

$$(47)\quad \begin{cases} y = \gamma\,\dfrac{\sin\frac{\nu x}{c}}{\sin\frac{\nu b}{c}}\cos\nu t \text{ von } x = o \text{ bis } x = b \\ y = \gamma\,\dfrac{\sin\frac{\nu}{c}(l-x)}{\sin\frac{\nu}{c}(l-b)}\cos\nu t \\ \text{von } x = b \text{ bis } x = l. \end{cases}$$

Wird die Dämpfung berücksichtigt, so ergeben sich kompliziertere Ausdrücke; es treten Phasendifferenzen gegen die erregende Kraft bezw. Schwingung auf, und der Nenner erhält solche Form, daß er nicht Null werden kann. In den obigen Fällen fehlender Dämpfung wird der Sinus im Nenner Null, die Amplitude y der erzwungenen Schwingung also unendlich, d. h. in Wirklichkeit nur sehr groß, wenn bei Erregung durch eine periodische Kraft $\frac{\nu l}{c} = k\pi$ wird oder, bei Erregung durch vorgeschriebene Bewegung des Punktes $x = b$, wenn entweder $\frac{\nu b}{c} = k\pi$ oder $\frac{\nu(l-b)}{c} = k\pi$ ist. Bei periodischer **Kraft** als Erregung findet demnach Resonanz statt, wenn die Erregungsfrequenz ν identisch ist mit einer der möglichen Eigenfrequenzen $(\omega_k)_0 = \frac{k\pi c}{l}$ der ganzen Saite. Die Amplitude der erzwungenen Schwingung hängt aber wegen des Faktors $\sin\frac{\nu b}{c}$ bzw. $\sin\frac{\nu(l-b)}{c}$ im Zähler noch von der Lage des Angriffspunktes der Kraft ab. Fällt dieser Punkt $(x = b)$ auf einen Knotenpunkt einer Partialschwingung der Saite, d. h. ist b ein aliquoter Teil der Saitenlänge l, dann werden diejenigen Schwingungen, welche daselbst einen Knoten besitzen, überhaupt nicht — oder in Wirklichkeit nur sehr schwach — erregt. Daß doch noch derartige Schwingungen vorkommen, rührt daher, daß die Erregung nie genau auf einen mathematischen Punkt beschränkt bleibt, sondern eine endliche Strecke der Saite umfaßt.

Wirkt aber zweitens nicht eine gegebene Kraft, sondern führt der Punkt b zwangsweise die Bewegung $y = \gamma\cos\nu t$ aus, so ist Resonanz vorhanden, wenn die Frequenz ν dieser vorgeschriebenen Bewegung identisch ist mit einer der möglichen Eigenfrequenzen der beiden Teilstücke von der Länge b und $l-b$, die diese als festeingespannte Saiten haben würden. Resonanz und damit Erhöhung der Schwingungsamplitude tritt hier aber nur immer für den einen der beiden Saitenabschnitte auf. Die beiden Teile verhalten sich wie getrennte Saiten und können auch in der Tat getrennt werden, ohne daß die Schwingung der Teilstücke sich ändert, wenn nur die vorgeschriebene Bewegung der bezüglichen Endpunkte, die vorher an der Stelle b zusammentrafen, unverändert beibehalten wird. Das kann z. B. dadurch geschehen, daß diese Endpunkte an einem schwingenden Körper von viel größerer Masse, als die Saite besitzt, befestigt werden, etwa an einer Stimmgabelzinke oder dgl.

Der Fall, daß dem einen Endpunkt einer am anderen Ende eingespannten Saite zwangsweise eine vorgeschriebene periodische Bewegung erteilt wird, ist natürlich in den Formeln (47) ohne weiteres enthalten. Man hat $b = l$ zu setzen, die erste der beiden Formeln, die für die Strecke $x = 0$ bis $x = b$ gilt, stellt alsdann die Bewegung dar. Es ist aber immer zu berücksichtigen, daß die Formel wegen mancher Vernachlässigungen (Außerachtlassung der Dämpfung, Annahme unendlich kleiner Elongationen, Annahme fehlender Rückwirkung der Saite usw.) nicht genau ist, und insbesondere für den Resonanzfall eigentlich versagt, da sie für $\sin\frac{\nu b}{c}$ unendlich große Elongationen y ergibt. Bis zu einem gewissen Grade stellt sie aber die Erscheinungen richtig dar. Vernachlässigt man die Dämpfung δ nicht, nimmt sie aber sehr klein an, so kann man mit Vernach-

lässigung kleiner Glieder von höherer Ordnung die Formel erhalten:

(48) $$y = \gamma \sqrt{\frac{\sin^2 \frac{\nu x}{c} + \frac{\delta^2 x^2}{c^2} \cos^2 \frac{\nu x}{c}}{\sin^2 \frac{\nu b}{c} + \frac{\delta^2 b^2}{c^2} \cos^2 \frac{\nu b}{c}}} \cos(\nu t + \varepsilon_x - \varepsilon_b)$$

für $x = 0$ bis $x = b$, wobei

(49) $$\operatorname{tg} \varepsilon_x = -\frac{x\delta}{c} \operatorname{ctg} \frac{\nu x}{c}; \quad \operatorname{tg} \varepsilon_b = -\frac{b\delta}{c} \operatorname{ctg} \frac{\nu b}{c}$$

Dies gilt für vorgeschriebene Bewegung des Punktes b. Hier wird im Resonanzfall, wo $\sin \frac{\nu b}{c} = 0$ ist, die Amplitude zwar groß, aber nicht unendlich.

16. Verallgemeinerung und Uebertragung der Ergebnisse von der Saite auf andere Körper (Stäbe, Platten usw.). Entsprechende Ueberlegungen wie für Saiten lassen sich für Stäbe, Membranen, Platten und andere elastische Körper mit Eigenschwingungen anstellen und zwar nicht nur für Biegungs- (Transversal-) schwingungen, sondern auch für Longitudinal- und Torsionsschwingungen. Die strenge analytische Behandlung ist aber noch wesentlich schwieriger. Ganz aussichtslos ist sie für einigermaßen komplizierte Körperformen, Stäbe mit stark veränderlichem Querschnitt, zusammengesetzte Stäbe, wie sie z. B. im Brückenbau vorkommen, gekrümmte Platten (Glocken), Platten mit ungleicher Dicke usw. In allen diesen Fällen muß man auf die genaue Bestimmung der Schwingungsfigur und auf die Berechnung der Amplituden als Funktion des Ortes verzichten. Es ist daher im allgemeinen auch nicht möglich, die tatsächliche dynamische Beanspruchung eines Konstruktionsteils im Maschinen-, Brückenbau usw. wirklich zuverlässig durch Rechnung zu bestimmen. Man kann aber dieselben allgemeinen Sätze, die oben an dem Fall der gespannten Saite besprochen wurden, auch hier anwenden. Das sind die folgenden: 1. Außergewöhnliche Erhöhung der Schwingungsamplitude, die eine unzulässig große Beanspruchung des Materials zur Folge haben kann, tritt ein, wenn die Erregungsfrequenz mit einer der Eigenfrequenzen des Körpers übereinstimmt, oder ihr sehr nahekommt. 2. Die Gefahr allzu hoher Amplituden ist um so größer, je geringer die Dämpfung der Eigenschwingungen ist. 3. Die erzwungene Schwingung setzt sich im allgemeinen aus einer Anzahl übereinander gelagerter Teilschwingungen mit verschiedenen Frequenzen zusammen, wenn die Erregung nicht einfach sinusförmig ist; daher ist auch die Resonanzfähigkeit des Körpers für etwaige in der Erregung enthaltene Oberschwingungen zu berücksichtigen. 4. Die Schwingungsfigur, d. h. die Amplitude der erzwungenen Schwingung als Funktion des Ortes betrachtet, die Amplitudenkurve oder anders ausgedrückt das Momentbild der Schwingung, wird gebildet durch Uebereinanderlagerung der Schwingungsfiguren der Haupt- oder Eigenschwingungen, mit anderen Worten, durch Uebereinanderlagerung der sogenannten Normalfunktionen des schwingenden Körpers. (Bei Saiten sind dies Sinus- und Cosinusfunktionen von der Form $\sin \frac{mx}{l}$ und $\cos \frac{mx}{l}$ bei Stäben die analogen Sinus- und Cosinusfunktionen nebst Hyperbelsinus und -cosinus, bei anderen Körpern kompliziertere Funktionen.) Die Koeffizienten dieser Reihenentwickelungen hängen von der Lage und Verteilung der Angriffspunkte der Erregung ab. Und es können hier insbesondere zwei Fälle hervorgehoben werden, nämlich 5. Geschieht die Erregung durch eine periodische Kraft, die übrigens in allen praktisch wichtigen Fällen meist nur lokal, d. h. auf einem im Verhältnis zur Gesamtausdehnung des Körpers kleinen Gebiet (Linien- oder Flächenelement, schmaler Oberflächenstreifen) wirkt, so werden diejenigen Schwingungstypen nicht erregt, welche an der Erregungsstelle Knoten besitzen, sei es Knotenpunkte, -linien oder -flächen. Mit den zu diesen Schwingungstypen (Normalfunktionen) gehörenden Eigenschwingungen kann daher auch keine Resonanz stattfinden. Uebereinstimmung der Erregungsfrequenz mit diesen Eigenfrequenzen ist ungefährlich. Dagegen: 6. Besteht die Erregung in vorgeschriebener zwangsweiser Bewegung eines beschränkten Gebietes des Körpers, so werden gerade diejenigen Schwingungstypen besonders stark erregt, welche an der Erregungsstelle Knoten besitzen. Hier kommt also Resonanz mit einer zugehörigen Eigenschwingung sehr in Betracht. Ebenso hat man im Falle 5 die Resonanzmöglichkeit zu berücksichtigen, wenn die Erregung nicht genau an der Knotenstelle erfolgt.

Praktisch wichtig sind die erzwungenen Schwingungen langer eiserner (und hölzerner) Brücken unter der Wirkung darüber fahrender Eisenbahnzüge. Als erzeugende Kräfte kommen hauptsächlich die periodischen Impulse der hin- und hergehenden Maschinenteile der Lokomotive in Betracht. Noch wichtiger ist der Fall einer Fußgängerbrücke mit taktmäßig marschierenden Menschenmengen. Bekanntlich dürfen Truppenverbände solche Brücken nicht im Gleichtritt passieren, weil die Gefahr

besteht, daß zufällig die Schrittfrequenz mit der Eigenfrequenz der Brücke übereinstimmt und daß infolge der Resonanz dabei die Schwingungsamplitude über das für den Bestand der Brücke zulässige Maß hinaus sich steigert und zum Einsturz führt.

Bruchgefahr tritt auch bei rotierenden Maschinenwellen auf, wenn der Antrieb ungleichförmig erfolgt, wie es bei Kolbenmaschinen immer der Fall ist, und die Periode einer der Torsionseigenschwingungen der Welle mit der Periode der Erregung zusammenfällt. Derartiges ist bei den langen Propellerwellen von Schraubendampfern mehrfach beobachtet worden. Die Torsionsschwingungen, welche infolge des ungleichförmigen Ganges entstehen und sich über die gleichförmige Rotation der Welle überlagern, werden bei einer gewissen „kritischen" Drehgeschwindigkeit extrem groß, eben infolge der geschilderten Resonanzwirkung. Die dadurch entstehenden sehr hohen Schubspannungen können die Welle zerbrechen.

Resonanzschwingungen bei gewissen kritischen Tourenzahlen beobachtet man ferner an den Fundamentplatten schnelllaufender Motoren (Elektromotoren, Turbinen). Bei diesen Tourenzahlen kommt das Fundament (z. B. ein Tisch, auf dem ein kleiner Elektromotor steht) in heftige vibrierende Bewegung, die unter Umständen als brummender Ton zu hören ist und sehr viel Energie verzehrt. Verschieben des Motors an eine andere Stelle hebt die Resonanz auf, aber nur dann, wenn es sich um Resonanz mit einer Oberschwingung des Fundamentes handelt, die Knotenlinien besitzt. Bei Resonanz mit der Grundschwingung hilft das natürlich nichts. Aehnliches gilt für die Vibrationen des Schiffskörpers unter den Impulsen schlecht oder gar nicht ausgeglichener Schiffsmaschinen. Aufstellung der Maschine an einer anderen Stelle oder besser Massenausgleichung derselben nach dem Schlick'schen Verfahren verringert oder beseitigt die Vibrationen.

17. Schwingungsfigur. Wandern der Knoten bei Aenderung der Erregungsfrequenz. Erzwungene Schwingungen mit halber und doppelter Frequenz der Erregung. Die Schwingungsfigur, welche sich bei erzwungenen Schwingungen ausbildet, enthält auch dauernde Nullstellen der Schwingung, d. h. Knotenpunkte, -linien usw., wie die Schwingungsfiguren der Eigenschwingungen. Diese Knoten liegen aber im allgemeinen nicht an denselben Stellen; ihre Lage (und Gestalt) ändert sich mit der Erregungsfrequenz. Z. B. wandern die Knotenpunkte einer einseitig eingespannten und am anderen Ende an einer Stimmgabel befestigten Saite und ebenso die Knotenflächen eines am einen Ende mit der Stimmgabel verbundenen Stabes, der am anderen frei oder auch fest eingespannt ist, mit steigender Schwingungszahl der erregenden Gabel über die Länge der Saite bezw. des Stabes fort. Jedesmal, wenn sie in eine Lage kommen, die mit der Knotenlage einer Eigenschwingung übereinstimmt, zeigt sich, daß die Erregungsfrequenz gerade gleich der Frequenz der betreffenden Eigenschwingung ist, und es tritt Resonanz mit plötzlicher Steigerung der Amplituden ein. Die Wanderung der Knotenflächen eines so behandelten Stabes bei allmählicher Steigerung der Erregungsfrequenz über die Frequenz der Grundschwingung hinaus zeigt Figur 16 für einen fest-freien (am einen Ende eingespannten, am anderen Ende freien) Stab. Die

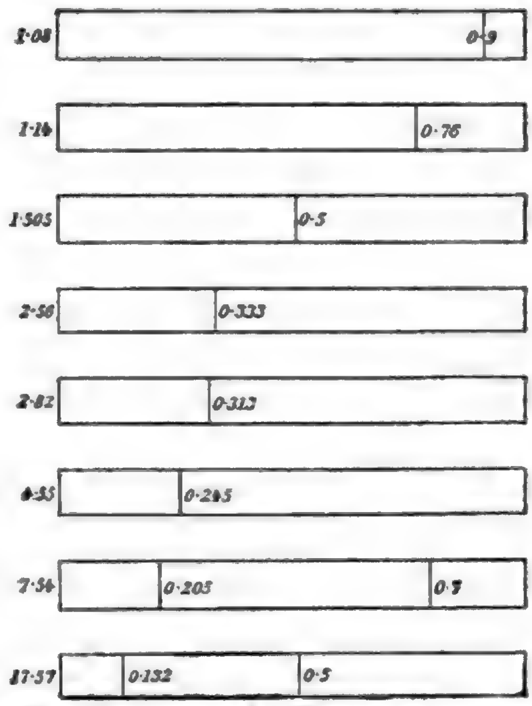


Fig. 16. Wanderung der Knoten bei erzwungenen Stabquerschwingungen.

Frequenz dieser Grundschwingung ist gleich 1 gesetzt und die Verstimmung der Erregungsfrequenz gegen sie, das Intervall der beiden Töne, am linken Rande als Dezimalbruch angegeben. Die Entfernung der Knoten vom linken, dem freien Ende des Stabes ist in Bruchteilen der Stablänge neben die Knotenlinien gesetzt. Resonanz ist hier — außer bei der Grundschwingung mit einem am Gabelende des Stabes gelegenen Knoten — vorhanden bei dem Intervall 6,30 mit einem zweiten Knoten bei 0,226 (die Figur fehlt), ferner bei dem Intervall 17,57 mit zwei weiteren Knoten bei 0,132 und 0,5. Das sind genau die Intervalle der Eigentöne und die Lage ihrer Knotenlinien. Die Figur ist einer experimentellen Untersuchung von

W. Elsässer (Annalen der Physik 13 [1904], S. 791) über erzwungene Stabschwingungen entnommen.

Mit den erzwungenen Saitenschwingungen hat sich Melde und in allerneuester Zeit noch C. V. Raman eingehend experimentell beschäftigt und sie nach verschiedenen Richtungen hin studiert. Sie sind leicht zu erzeugen und lassen mannigfache Formen zu. Durch Veränderung der Saitenspannung kann man, während die Erregung andauert, die Eigenfrequenzen der Saite ändern und sie auf die Erregung abstimmen. Dabei beobachtet man sehr schön das Wandern der Knoten. Interessant ist es, daß man bei geeigneter Anordnung mittels einer gegebenen Frequenz ν der Erregung erzwungene Saitenschwingungen mit der halben Frequenz $\frac{\nu}{2}$ erzeugen kann; umgekehrt kann man, wenn man die Saite als Erreger benutzt, die an ihrem Ende befestigte Gabel oder irgendeinen anderen Körper daselbst in erzwungene Schwingungen von der doppelten Frequenz der Saitenschwingungen versetzen. Man erhält gleiche Frequenz der erregenden und erzwungenen Schwingung, wenn die Schwingungsrichtungen beider parallel sind, dagegen doppelte bezw. halbe Frequenz, wenn sie zwar in dieselbe Ebene fallen, aber zueinander senkrecht stehen. Ersteres ist der Fall bei der Anordnung Figur 17b, wo die Saitenrichtung in die Zinkenrichtung der Gabel fällt, letzteres bei der Anordnung Figur 17a,

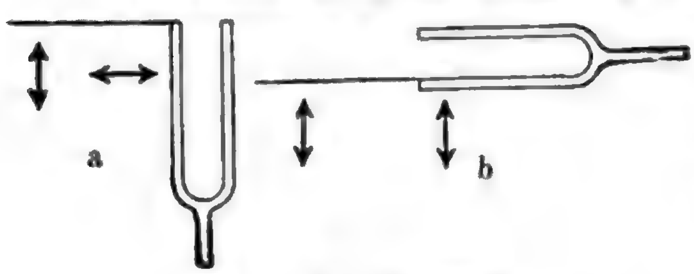


Fig. 17a und b.

wo die Saite senkrecht zur Zinkenrichtung steht. Die Doppelpfeile geben die Bewegungsrichtungen an. Es ist ohne weiteres klar, daß im Fall a die Gabelzinke schon eine ganze Schwingung in derselben Zeit ausführt, in der die Saite erst eine halbe (Hin- und Rückgang von der Mittellage nach unten oder nach oben) ausführt. Diese Eigentümlichkeit schwingender Saiten, erzwungene Schwingungen doppelter Frequenz zu erregen, kann bei Musikinstrumenten in Betracht kommen, wo der Steg bezw. der untere Befestigungspunkt in derartige Schwingungen versetzt werden muß, die neben den erzwungenen Schwingungen von gleicher Frequenz, wie sie die Saite selbst besitzt, auftreten und den Klang beeinflussen können.

18. Resonanz gasförmiger Körper. Zylinder- und Kugelresonatoren. Ebenso wie feste Körper können auch gasförmige und flüssige in erzwungene oder Resonanzschwingungen versetzt werden. Besonders Gase (Luft) kommen in Betracht. Damit diese, was zur Entstehung von Resonanz unbedingt nötig ist, bestimmte Eigenschwingungen besitzen, müssen sie eine fest umgrenzte Form haben, also von festen Wänden umschlossen sein. Form und Größe des so geschaffenen Hohlraums bestimmt zusammen mit der Schallgeschwindigkeit des eingeschlossenen Gases die Eigenfrequenzen (Höhe der Eigentöne). Wichtig sind vornehmlich zwei Formen, 1. die Gassäulen in den Orgelpfeifen und anderen Blasinstrumenten, sowie den Zylinderresonatoren, 2. die kubischen Pfeifen bei den kubischen Resonatoren, speziell den Kugelresonatoren. Bei jenen erstreckt sich die Gasmasse vornehmlich in einer Dimension, bei diesen annähernd gleichmäßig nach allen drei Dimensionen. Zu den ersteren können als Abart auch die konischen Gassäulen der Kegelresonatoren und Schalltrichter gerechnet werden.

Die Eigenschwingungen dieser ersten Klasse, der Gassäulen, entsprechen den Eigenschwingungen der Saiten in bezug auf die Lage der Knoten und Bäuche und die Reihe der möglichen Partialtöne; dementsprechend verhalten sich auch ihre erzwungenen Schwingungen. Jede Erregung mit irgendeiner Frequenz bewirkt eine im allgemeinen schwache erzwungene Schwingung. Wenn aber die erregende Frequenz mit einer möglichen Eigenschwingung ganz oder nahezu zusammenfällt, tritt ausgesprochene Resonanz mit bedeutender Tonverstärkung auf. Das läßt sich leicht mit einer Stimmgabel zeigen, die man anschlägt und vor eine Röhre aus Messing, Pappe, Glas oder dgl. hält, deren Länge man ändern kann, bei einem (senkrecht stehenden, unten geschlossenen) Gaszylinder z. B. durch Eingießen von Wasser, bei den anderen durch Ueberschieben eines zweiten genau darauf passenden Rohres nach Art der Fernrohrauszüge. Bei bestimmten Längen der Gassäule nimmt man ein plötzliches Anschwellen des Tones der davorgehaltenen Gabel wahr. Derartige, an einem Ende geschlossene Röhren entweder von fester oder in der angegebenen Weise variabler Länge werden bei wissenschaftlichen Untersuchungen als Zylinderresonatoren zur Verstärkung und Aussonderung bestimmter Töne aus einem Tongemisch benutzt.

Gasgefüllte Hohlräume mit nach allen drei Dimensionen gleichmäßig ausgebildeten Abmessungen werden nach G. Kirchhoff als kubische Pfeifen bezeichnet. Derartige

vollständig nach außen abgeschlossene Hohlräume haben ebenfalls ihre bestimmten Eigenschwingungen mit bestimmten, durch Gestalt und Größe der Umgrenzungsfläche bedingten Frequenzen, Knotenflächen und Bäuchen. Dementsprechend ist auch Resonanz bei Erregung mit diesen Frequenzen zu erwarten. Es besteht jedoch eine gewisse Schwierigkeit. Die theoretische Behandlung der Eigenschwingungen solcher Gasmassen (z. B. in einer Kugel oder einem Hohlwürfel) setzt voraus, daß dieselben ganz nach außen abgeschlossen sind. Eine Oeffnung in der Wand würde eine Störung der Schwingungsform ergeben. Man kann also scheinbar solche kubische Pfeifen eigentlich nicht von außen zu ihren normalen Eigenschwingungen anregen und hat diese Form der Benutzung bisher unterlassen. Erst neuerdings hat M. Wien gezeigt (Physikal. Zeitschrift 1912, Nr. 21/22), daß diese Art der Anwendung sehr wohl möglich ist, und daß man scharfe Resonanzmaxima erhält. Man kann dabei Resonanz sowohl mit dem Grundton, wie auch mit Obertönen herstellen und so mit sehr hohen Tönen arbeiten, ohne daß die Abmessungen des Resonators allzu klein werden. Derartige Kugelresonatoren werden von Wien zur Verstärkung von Telephontönen vorgeschlagen. Die Erregung findet durch eine enge Oeffnung in der Wand statt, in die ein Zuleitungsrohr mündet.

Kubische Pfeifen können aber noch in anderer Weise als Resonatoren dienen, wobei der Schwingungstyp ein ganz anderer ist. Das ist die von Helmholtz theoretisch behandelte und in die experimentelle Forschung eingeführte Form des kubischen Resonators, speziell des Kugelresonators. Während aber bei der ersten Art der Anwendung, dem Wien-Rayleighschen Resonator, wie er kurz genannt werden möge, Form und Größe des Hohlraums die Tonhöhe des Resonators, d. h. seine Resonanzfrequenz, ausschlaggebend bestimmen, und die Größe der Oeffnung oder der Oeffnungen nur nebensächlich ist, kommt es bei dem Helmholtzschen Resonator nur auf die Größe, nicht auf die Gestalt des Hohlraumes, dagegen sehr auf Größe und Gestalt der Oeffnungen an. Die Resonanztonhöhe ist bei gleicher Größe des Hohlraumes für den Helmholtzschen Resonator viel tiefer als für irgendeinen der Resonanztöne des Wien-Rayleighschen Resonators. Der Unterschied beruht auf dem verschiedenartigen Schwingungstypus. Bei dem Wien-Rayleighschen Resonator werden die Eigentöne des geschlossenen Hohlraumes erregt, deren Wellenlängen höchstens von der Größenordnung der Resonatorabmessungen sind, wobei die ganze Gasmasse, eventuell abteilungsweise, mitschwingt. Bei dem Helmholtzschen Resonator dagegen schwingt nicht die ganze eingeschlossene Gasmasse gleichmäßig, sondern nur verhältnismäßig kleine Teile von ihr werden stark bewegt, nämlich annähernd konisch geformte Gebiete, deren Spitzen in den kleinen Oeffnungen liegen und die sich gegen die gegenüberliegende Wand bezw. gegeneinander erstrecken. Der Rest der Gasmasse schwingt nur schwach mit, wirkt aber dabei gewissermaßen als Ballast und vertieft die Tonhöhe der zustandekommenden Schwingung. Für einen Resonator vom Volumen S mit einer kleinen kreisförmigen Oeffnung vom Radius R, gefüllt mit Gas, dessen Schallgeschwindigkeit c ist, berechnet sich nach Helmholtz die Resonanzfrequenz (Schwingungszahl in der Sekunde) zu

(50) $$N = \frac{c\sqrt{R}}{\pi\sqrt{2S}}.$$

Bei zwei Oeffnungen mit den Radien R und R_1 wird sie

(50a) $$N = \frac{c\sqrt{R + R_1}}{\pi\sqrt{2S}}.$$

Solche Kugelresonatoren können daher bei gleichbleibendem Volumen durch Verändern der Oeffnung in gewissen Grenzen abgestimmt werden.

V. Anwendungen insbesondere der Resonanz.

19. Anwendungen. Resonanz bei Musikinstrumenten usw. Frahmscher Frequenzmesser. Frequenzmessung in der drahtlosen Telegraphie. Resonanz wird auf den verschiedensten Gebieten benutzt. Ihrem ganzen Wesen nach dient sie stets dazu, kleine Bewegungen von ungenügender Größe zu verstärken und eine unter Umständen machtvolle Wirkung zu erzielen. Daß man mit ganz geringen Kräften schwere Massen in heftige Schwingungen versetzen kann, ist bekannt. Es braucht nur an das alte Beispiel der Kirchenglocke erinnert zu werden, die durch taktmäßig im richtigen Rhythmus erfolgende Anstöße allmählich in immer stärkere Schwingungen versetzt wird. Noch geläufiger wird jedem dieselbe Erscheinung von der Schaukel her sein, die ebenso wie die Glocke nichts anderes ist als ein Pendel, d. h. ein schweres schwingungsfähiges System mit bestimmter Eigenperiode.

In der Musik wird die Resonanz in mannigfacher Weise verwertet. In erster Linie ist an die Resonanz der Luftsäulen in den Blasinstrumenten (Orgelpfeifen, Trompeten, Posaunen, Flöten usw.) zu denken. Hier ist scharf ausgeprägte Resonanz für bestimmte diskrete Frequenzen vorhanden. Erst durch die Tonverstärkung, die infolge Resonanz

der auf die Erregung abgestimmten Luftsäulen eintritt, kommen bei diesen Instrumenten brauchbare Töne zustande. Bei den Saiteninstrumenten wird ebenfalls das erzwungene Mitschwingen benutzt, in das der hölzerne Resonanzboden des Klaviers oder der hohle Holzkörper der Geige usw. versetzt wird. Doch handelt es sich hier nicht um ausgeprägte Resonanz für einige wenige Töne, sondern im Gegenteil um nahezu gleichmäßige Verstärkung aller Töne eines gewissen mehr oder weniger umfangreichen Tonbereiches. Man dürfte hier eigentlich kaum von Resonanz sprechen, wenn man dies Wort in der engeren Bedeutung beibehalten will. Doch ist die Bezeichnung Resonanz gerade auf musikalischem Gebiete zu fest eingebürgert, als daß hier die strenge physikalische Unterscheidung durchdringen könnte.

Wahrscheinlich beruht ferner der Vorgang des Hörens im Ohr, die Unterscheidung der einzelnen Töne, auf Resonanz. Nach der von Helmholtz aufgestellten Resonanztheorie des Hörens enthält die Ohrschnecke eine große Anzahl auf die einzelnen Töne abgestimmter Resonatoren, die jeder nur auf einen sehr eng begrenzten Tonbezirk ansprechen (vgl. die Artikel „Schall“ und „Klang“).

In der Technik wird die Resonanz neuerdings zur Frequenzmessung zahlreicher periodischer Vorgänge benutzt. Die Umdrehungszahl von Maschinen wird dadurch bestimmt und dauernd kontrolliert, daß man die von ihnen ausgehenden periodischen Erschütterungen auf eine Reihe von Stahlzungen (dünne, am einen Ende eingeklemmte Lamellen) wirken läßt, die wie die Zähne eines Kammes nebeneinander auf einer Leiste befestigt sind und deren Eigenfrequenzen (für Transversalschwingungen) von einer zur anderen um einen geeigneten geringen Betrag (etwa eine Viertelschwingung in der Sekunde) wachsen (Fig. 18). Durch Resonanz

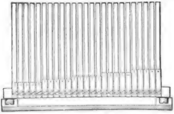


Fig. 18. Frahmscher Resonanzkamm.

kommt diejenige Zunge in hervorragend starke Schwingung, deren Eigenfrequenz der erregenden Frequenz am nächsten liegt (Frahmscher Frequenzmesser). Die periodische Erregung kann auch elektromagnetisch durch Wechselstrom erfolgen, dessen Frequenz mit der Umdrehungszahl der Maschine zwangsläufig verknüpft ist, und der kleine, vor den Stahlzungen angebrachte Elektromagnete durchfließt. Insbesondere wird auf diese Weise die Periodenzahl des Stromes in Wechselstromnetzen kontrolliert. Die Figur 19 zeigt einen solchen

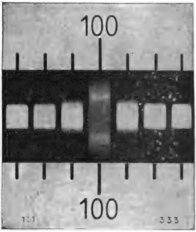


Fig. 19. Frahmscher Frequenzmesser.

Frequenzmesser in Betrieb. Man sieht die mit weißen Emailleköpfen versehenen Zungen von oben und bemerkt die große Verschiedenheit der Amplituden.

Die hier technisch verwertete Wirkung kleiner mechanischer Erschütterungen auf schwingungsfähige Systeme zeigt sich sehr schön an dem als Demonstrationsobjekt dienenden Frahmschen Kreisel. Ein kleines, mit schwerem Rand versehenes Schwungrad, dessen Masse nicht ganz symmetrisch um die Achse verteilt ist — es genügt schon ein kleines Loch an einer Stelle des Radumfanges — übt auf die Lager seiner Achse periodische Stöße aus, deren Frequenz von der Umdrehungszahl abhängt. An dem Rahmen, der die Lager trägt, sind einige der beschriebenen Stahlzungen befestigt. Bei bestimmten Drehgeschwindigkeiten des Rades, das wie ein Kreisel mit einer Schnur in Bewegung gesetzt wird, kommt die eine oder die andere Zunge in Schwingungen, und zwar bei allmählich abnehmender Drehungsgeschwindigkeit immer längere, langsamer schwingende Zungen.

Ganz besonders wichtig ist die Resonanz bei Messungen an elektromagnetischen Schwingungskreisen. Um die Schwingungs-

zahl ankommender elektrischer Wellen in der drahtlosen Telegraphie zu bestimmen, hat man als einziges Mittel die Resonanz. Man läßt die Wellen auf einen Resonator — elektrischen Schwingungskreis geeigneter Form — wirken, dessen Frequenz man kennt und durch Veränderung der Selbstinduktion oder Kapazität oder auch beider meßbar variieren kann. Bei maximalem Ansprechen dieses „Meßkreises" ist Gleichheit der Frequenz vorhanden. Dasselbe Mittel benutzt man, um Schwingungskreise abzustimmen, die als Sender dienen sollen. Man koppelt dann den zu untersuchenden Kreis möglichst lose, um Rückwirkung und dadurch entstehende Aenderung der Schwingungszahlen zu vermeiden, mit dem Meßkreis und läßt, wie der gewöhnlich benutzte Ausdruck lautet, den Kreis auf den Meßkreis induzieren. Die Koppelung kann magnetisch oder elektrisch sein, meist ist sie magnetisch

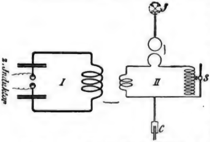


Fig. 20. Anordnung zur Frequenzmessung elektrischer Schwingungen mittels Resonanz.

und wird durch einige Windungen der Schließungsdrähte (Koppelungsspulen) besorgt. In den Meßkreis muß ein Instrument zur Messung des Effektes (Stromeffekt oder Spannungseffekt) eingeschaltet sein. Da dieses den Ablauf der Schwingungen im Meßkreis stören kann, so schaltet man es meist erst in einen dritten Kreis, den Indikatorkreis, ein, auf den der Meßkreis induziert und der, wenn nötig, auch mit dem Meßkreis gleichgestimmt wird. Er ist mit diesem stets nur extrem lose gekoppelt. Es entsteht so eine Anordnung, die in Figur 20 schematisch dargestellt ist. J ist der Indikatorkreis, II der Meßkreis und I der zu untersuchende Kreis. Die technischen Frequenzmesser (Wellenmesser) der drahtlosen Telegraphie sind meist nach diesem Prinzip gebaut und unterscheiden sich nur durch die konstruktive Anordnung der einzelnen Teile und die Art der Koppelung. Ein solcher Frequenzmesser älterer Konstruktion der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie (Telefunken) ist in Figur 21 abgebildet. Der in der Mitte sichtbare Zylinder ist ein verstellbarer Drehscheibenkondensator, um die Kapazität stetig zu ändern; die Selbstinduktion wird durch Austausch der rechts befestigten Spule gegen andere Spulen sprungweise variiert. Neuere Konstruktionen dieser und anderer Firmen sind noch bequemer und zweckmäßiger eingerichtet. Die ältesten Formen der Frequenzmesser, einfache Drahtspulen auf Glasstäben, die unveränderliche Frequenz besitzen, und durch lebhaftes Funkensprühen und Leuchten an den Enden Resonanz mit der sie treffenden elektrischen Welle anzeigen (Slabysche Multiplikationsstäbe usw.) haben nur noch als Demonstrationsmittel Interesse.

20. Weitere Anwendungen. Verstärkung der Wirkung durch Resonanz bei Senderantennen. Resonanztransformator. Vibrationsgalvanometer. Optisches Telephon. Noch in anderer Weise leistet die Resonanz in der drahtlosen Telegraphie Dienste. Sie dient dazu, die Senderschwin-

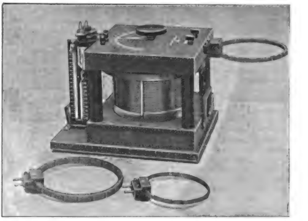


Fig. 21. Wellenmesser (Frequenzmesser) der drahtlosen Telegraphie.

gungen bei möglichst geringem Energieverbrauch möglichst kräftig zu machen. Wird eine Senderantenne von einem Oszillatorkreise gespeist, der andere Frequenz besitzt als die Antenne, so sind die erzwungenen Schwingungen in dieser schwach und man muß sehr große Energiemengen aufwenden, um diejenigen Spannungen in der Antenne zu erzeugen, welche zur Aussendung hinreichend kräftiger Wellen nötig sind. Durch Abstimmung beider Systeme aufeinander wird der Betrieb wesentlich ökonomischer und die Wirkung, d. h. hier die Reichweite des Senders, wächst. Dieselbe Wirkung, die sonst nur durch eine plötzliche, sehr kräftige, einem starken Schlage, einer Art Explosion gleichkommende Entladung zu erreichen ist, wird bei Resonanz durch allmähliche Summierung kleiner Wirkungen erzielt.

Dasselbe Prinzip der allmählichen Steigerung durch Summierung liegt auch dem Resonanztransformator von Boas zugrunde, der für den Betrieb mit gewöhnlichem Wechselstrom eingerichtet ist (Fig. 22).

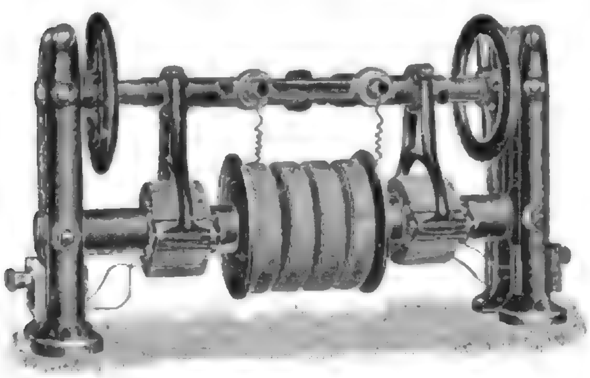


Fig. 22. Resonanzinduktor.

Der bekannte Funkeninduktor, der in seiner gewöhnlichen Form bei Betrieb mit Wechselstrom keine genügende Sekundärspannung ergibt, ist so umgeformt, daß die Sekundärspule aus mehreren Einzelspulen besteht, die auf demselben Eisenkern sitzen wie die primären und mit diesen durch Verschieben der letzteren mehr oder weniger fest gekoppelt werden können.

Werden die Pole der Sekundärspule zu den Belegungen eines Kondensators geleitet, der geladen werden soll, so entsteht ein von diesem und der Spule gebildeter Kondensatorkreis, dessen Eigenfrequenz durch passende Wahl des Kondensators und der Anzahl der Sekundärspulen in gewissen Grenzen variiert werden kann. Er kann somit auf die Frequenz des primären Wechselstroms abgestimmt werden. Die Folge ist, daß schon mit verhältnismäßig niedriger Spannung und Stromstärke des Primärkreises hohe Spannungen und Funkenentladungen im Sekundärkreis erzeugt werden, indem bei jeder Schwingung des Primärkreises die Spannung im Sekundärkreis etwas weiter erhöht wird, bis die Entladungsspannung erreicht ist. Durch Variation der Koppelung kann die Wirkung reguliert und insbesondere die Zahl der Funkenentladungen in der Zeiteinheit verändert werden.

Als weitere Anwendungen der Resonanz erzwungener Schwingungen können zwei zur Erkennung und Messung langsamerer elektrischer und akustischer Schwingungen dienende Instrumente angeführt werden: das Vibrationsgalvanometer (eine Konstruktion von Rubens, eine andere von M. Wien) und das optische Telephon von M. Wien. Bei ersterem wird eine Stahlsaite oder eine mit einem Eisenstückchen versehene Saite aus beliebigem Material zwischen den Polen eines kleinen von Wechselstrom durchflossenen Elektromagneten in starke Torsionsschwingungen versetzt, sobald durch Anspannen der Saite ihre Eigenfrequenz mit der Frequenz des Stromes gleichgemacht wird. Die Ausschläge werden mittels eines leichten, an der Saite befestigten Spiegelchens abgelesen. Bei dem optischen Telephon wird die maximale Schwingung einer Membran oder dünnen Platte (Telephonmembran), die bei Resonanz auftritt, ebenfalls mittels eines leichten, an ihr in eigenartiger Weise befestigten Spiegelchens gemessen.

In allen diesen Fällen wird von der Resonanz ausgiebig Gebrauch gemacht. Es gibt jedoch auch wichtige Anwendungen erzwungener Schwingungen, bei denen die Resonanz stört und deshalb nach Möglichkeit unterdrückt wird. Dazu gehört in erster Linie das allbekannte Hörtelephon. Die Telephonmembran (eine dünne Eisenplatte) wird durch die in das Telephon gesandten pulsierenden Ströme in erzwungene Schwingungen versetzt. Damit nun die Sprache in ihrem Klange möglichst unverändert wiedergegeben werde, muß die Membran auf alle Frequenzen gleich gut reagieren, es darf keine bevorzugt werden. Diese Forderung ist nur annähernd erfüllt; zu ihren Gunsten wirkt hauptsächlich die starke Eigendämpfung der Membran, welche keine ausgesprochene scharfe Resonanz aufkommen läßt, trotzdem die Eigentöne der Membran zum großen Teil in den Bereich der für die Sprachlaute charakteristischen Frequenzen (500 bis 3000 in der Sekunde) hineinfallen. Immerhin macht sich die Resonanz dieser Eigentöne stets durch eine gewisse Klangveränderung bemerkbar, die für verschiedene Telephontypen verschieden ist. Ganz dasselbe gilt für die Membranen anderer akustischer Apparate (Mikrophon, Phonograph, Grammophon usw.).

Erzwungene Schwingungen führen die Schreibwerke aller Apparate zur Aufzeichnung periodischer Bewegungen aus (Erdbebenregistrierapparate, Indikatoren an

Dampfmaschinen usw., Aufnahmemembranen an physiologischen Apparaten zur Untersuchung der Herzbewegungen, der Sprachlaute u. a.). Besonders hervorzuheben ist in dieser Hinsicht wegen seiner einfachen und zweckentsprechenden Konstruktion der zur Aufzeichnung langsamer Wechselströme dienende Oszillograph von Duddell, eine Art Galvanometer, bei dem eine leichte, von Wechselstrom durchflossene Drahtschleife zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten schwingt. Bei allen diesen Apparaten kommt es darauf an, daß die Amplituden von Schwingungen ganz verschiedener Frequenz alle im gleichen Maßstab wiedergegeben werden, und daß die Schwingungsformen möglichst rein und frei von Störungen durch übergelagerte Eigenschwingungen aufgezeichnet werden. Das letztere wird durch entsprechende Dämpfung erreicht, das erstere dadurch, daß man durch geeignete Dimensionierung der Apparate die Eigenfrequenz des registrierenden Teils von derjenigen der aufzunehmenden Schwingungen möglichst verschieden macht. Meist wird das registrierende mitschwingende System möglichst klein und leicht, seine Eigenfrequenz also recht groß gemacht; es folgt dann der erzwingenden Schwingung so gut wie momentan und die schnellen übergelagerten Eigenschwingungen stören nicht.

VI. Erzwungene Schwingungen in der Optik.

21. Die gebundenen Elektronen als Resonatoren. Absorption und Dispersion des Lichtes. Inverser Zeemaneffekt. Erzwungene Schwingungen elektrisch geladener Teilchen in den Atomen bezw. Molekülen der ponderablen Körper und die mit solchen Schwingungen verknüpften Erscheinungen bilden die Grundlage zur Erklärung einer Reihe von optischen Erscheinungen (Zeemaneffekt, magnetische Drehung der Polarisationsebene; Absorption, Dispersion und Zerstreuung des Lichtes; Fluoreszenz). Außerdem sind in neuester Zeit Erscheinungen beobachtet und experimentell erforscht worden, die sogenannten Resonanzspektra, welche kaum eine andere Erklärung zuzulassen scheinen als die angedeutete.

Der Gedanke, kleinste Teilchen innerhalb der Körper anzunehmen, die an bestimmte Ruhelagen gebunden sind und um diese Schwingungen ausführen können, und diese Vorstellung zur Grundlage einer Dispersionstheorie zu machen, ist schon vor Helmholtz aufgetaucht. Maxwell hat, wie neuerdings bekannt geworden ist, eine solche Theorie aufgestellt. Ferner hat Sellmeier dazu die Ansätze gemacht. Bekannt und allgemeiner anerkannt worden ist aber erst die Helmholtzsche Theorie, die später von Ketteler verbessert worden ist. Man faßt sie meist unter dem Namen der Ketteler-Helmholtzschen Dispersionstheorie zusammen. Die Grundlagen dieser Theorie sind bis jetzt geblieben, die Vorstellungen im einzelnen haben sich gewandelt, insbesondere durch die Einführung der kleinen elektrisch geladenen Teilchen (Elektronen, Ionen, Korpuskeln oder auch Quanten genannt) in unsere Vorstellungen von dem Aufbau der Materie. Diese Teilchen, die mit den Körperatomen zusammen die Materie bilden oder vielleicht nach neuester Annahme überhaupt die Elementarbausteine sind, aus denen sich auch die ponderablen Atome zusammensetzen, werden in der elektro-magnetischen Lichttheorie als die schwingenden Teile (Resonatoren) angesehen, die die Theorie erfordert. Damit diese geladenen Teilchen, die der Kürze halber alle Elektronen genannt werden sollen, als Resonatoren wirken können, müssen sie Eigenschwingungen mit bestimmter, für jedes Elektron charakteristischer Frequenz ausführen können. Um diese Möglichkeit zu schaffen, wird die Annahme gemacht, daß die Teilchen an gewisse Ruhelagen im Innern — oder auch an der Oberfläche — der Atome gebunden sind, in welche sie mit einer der Entfernung proportionalen, sogenannten quasielastischen Kraft zurückgezogen werden, wenn man sie daraus entfernt. Außerdem wird zur notwendigen Vervollständigung angenommen, daß auf ihre Bewegung eine hemmende Reibungskraft wirkt, die der jeweiligen Geschwindigkeit proportional gesetzt wird. Diese Annahmen sind durchaus willkürlich, und man hat außer in ganz speziellen Fällen noch keine Erklärung für die Entstehung dieser Kräfte, insbesondere der quasielastischen Kraft, aus den ganz anders gearteten elektrostatischen Kräften zu finden vermocht. Sie sind aber als die einfachsten und für die Rechnung brauchbarsten durchaus natürlich. Ein solches gebundenes Elektron — außer diesen sind noch freie Elektronen vorhanden, die sich zwischen den Atomen bewegen — führt danach exponentiell gedämpfte, sinusförmige Eigenschwingungen aus, und man kann ohne weiteres alle von den gleichen Schwingungen des Massenpunktes bekannten Sätze hier anwenden. Hinzuzufügen ist noch die Annahme, daß diese geladenen Teilchen eine gewisse ponderable Masse besitzen und daß für alle Teilchen einer und derselben Art diese Masse den gleichen Wert hat. Ebenso ist die elektrische Ladung in diesem Falle gleich; für (negative) Elektronen

ist sie gleich dem elektrischen Elementarquantum.

Um möglichst allgemeine Resultate zu erhalten, kann man weiter annehmen, daß diese Teilchen nicht einzeln, sondern zu Systemen vereinigt in den Atomen vorkommen. und erhält somit den Fall eines Punktsystems mit mehreren Freiheitsgraden, wie er unter 8 besprochen worden ist. Die in jenem Fall gültigen Sätze erlangen hier eine große praktische Bedeutung.

Die zur Erzeugung erzwungener Schwingungen nötigen periodischen Kräfte sind hier die elektrischen und magnetischen Kräfte der elektromagnetischen Wellen, welche den Körper durchsetzen. Liegt die sekundliche Frequenz dieser Wellen zwischen etwa 375 Billionen und 750 Billionen, so sind die Wellen Lichtwellen. Von dieser Größenordnung müssen also die Eigenfrequenzen der Elektronen in den Atomen sein, damit Resonanzerscheinungen eintreten können, die im sichtbaren Teil des Spektrums zur Geltung kommen. Die direkt zu beobachtende Folge der Resonanz ist erstens starke Energieentziehung seitens des getroffenen Elektrons aus der den Körper durchziehenden Lichtwelle von gleicher Frequenz, also, wenn gleichzeitig Wellen mit allen möglichen verschiedenen Frequenzen hindurchgehen, das Auftreten einer Absorptionslinie im Spektrum an der der Eigenfrequenz des Elektrons entsprechenden Stelle; und zweitens im Zusammenhang damit eine schroffe, fast wie eine Unstetigkeit erscheinende Aenderung im Werte des Brechungsexponenten an dieser Stelle des Spektrums (vgl. dazu den Artikel „Lichtdispersion").

Zu den periodischen elektrischen und magnetischen Kräften der Lichtwellen können noch konstante äußere Kräfte dieser Art hinzutreten, z. B. ein konstantes Magnetfeld, in das der Körper hineingebracht wird. Ein solches Magnetfeld hat die Wirkung, daß die Bewegungen des Elektrons nach den drei Richtungen im Raume, die bisher als unabhängig voneinander angenommen worden sind, miteinander gekoppelt werden. Schon ein einzelnes Elektron bildet also in diesem Falle ein gekoppeltes System. Die notwendige Folge ist, daß das Elektron nicht mehr bloß auf eine Frequenz, seine natürliche Eigenfrequenz, anspricht, sondern auf zwei, von dieser etwas verschiedene Frequenzen, die Eigenfrequenzen des gekoppelten Systems. Statt einer Absorptionslinie treten im Spektrum also zwei auf, wenigstens wenn das Licht parallel den Kraftlinien des Magnetfeldes hindurchgeht; bei senkrechtem Durchgang sind es drei, weil noch die unveränderte Komponente mit dazu kommt. Die Bewegungsgleichungen eines solchen Elektrons werden nämlich nach H. A. Lorentz

$$
(50)\quad \begin{cases}
m\dfrac{d^2\xi}{dt^2} = e(E_x + aP_x) - f\xi - g\dfrac{d\xi}{dt} + \dfrac{e\mathfrak{H}}{c}\dfrac{d\eta}{dt} \\[2ex]
m\dfrac{d^2\eta}{dt^2} = e(E_y + aP_y) - f\eta - g\dfrac{d\eta}{dt} - \dfrac{e\mathfrak{H}}{c}\dfrac{d\xi}{dt} \\[2ex]
m\dfrac{d^2\zeta}{dt^2} = e(E_z + aP_z) - f\zeta - g\dfrac{d\zeta}{dt}
\end{cases}
$$

Die beiden ersten davon haben die charakteristische Form der Gleichungen erzwungener Schwingungen eines gekoppelten Systems. Es bedeuten ξ, η, ζ die Verschiebungen des Elektrons mit der Masse m und der Ladung e in den drei Koordinatenrichtungen, f und g sind Konstante (Direktionskraft und Dämpfungskonstante), ebenso a; $\mathfrak{H}$ ist das äußere konstante Magnetfeld, dessen Richtung mit der z-Achse zusammenfällt, was man stets erreichen kann, da man ja irgendeine Richtung des Raumes als z-Achse wählen kann. E mit den Komponenten E_x, E_y, E_z ist die elektrische Kraft der Lichtwelle, P ebenso die durch die Verschiebung hervorgerufene elektrische Polarisation, die als rücktreibende Kraft zu der quasielastischen Kraft $f\xi$ usw. hinzukommt, wobei $P_x = Ne\xi$ ist, wenn N die Zahl der Elektronen in der Volumeneinheit darstellt. Die äußere Kraft, welche die erzwungene Schwingung erregt, ist also E allein. Ist kein konstantes Magnetfeld vorhanden ($\mathfrak{H} = 0$), so hat man offenbar drei voneinander unabhängige erzwungene Schwingungen gleicher Frequenz. Die Absorption ist also von der Richtung des hindurchgehenden Lichtes unabhängig. Ist aber $\mathfrak{H}$ nicht gleich Null, so erhält man offenbar eine ungekoppelte und zwei gekoppelte Schwingungen. Das einfache, hier angeführte Gleichungssystem enthält die Erklärung für den inversen Zeemaneffekt in seiner einfachsten Form. Wenn, wie es häufig beobachtet wird, eine kompliziertere Aufspaltung einer Absorptionslinie im Magnetfeld erfolgt, so muß man statt des einen Elektrons ein System mehrerer Elektronen, also von vornherein ein gekoppeltes System annehmen, das durch das Magnetfeld noch weiter verkoppelt wird. Die Erscheinungen sind im allgemeinen hier wie dort denen des direkten Zeemaneffektes analog, dessen Theorie auf die freien Schwingungen gekoppelter Systeme führt (vgl. auch die Artikel über „Magnetooptik" und „Elektrooptik"). Es sei noch darauf hingewiesen, daß die moderne Theorie der Strahlung, wie Planck u. a. sie entwickelt

haben, ganz auf der Vorstellung geladener Teilchen (Elektronen) beruht, die gleichzeitig als Oszillator und als Resonator wirken.

22. Fluoreszenz. Woodsche Resonanzspektren des Natriumdampfes usw. Eine des höchsten Interesses werte Erscheinung ist die von R. W. Wood entdeckte optische Resonanz in gewissen Gasen und Dämpfen. Sie schließt sich eng an die längst bekannte Erscheinung der Fluoreszenz an. Wenn man gewisse Stoffe mit bestimmten, aus dem Spektrum ausgewählten Strahlen, die auch dem Ultravioletten angehören können, belichtet, so werden sie selbstleuchtend, sie fluoreszieren (vgl die Artikel „Lumineszenz“ und „Strahlungsumformungen“); das von ihnen ausgesandte Licht hat im allgemeinen eine andere Farbe als das erregende und zwar ist es meist weiter nach dem roten, d. h. langwelligeren Ende des Spektrums hin verschoben und erstreckt sich dabei über ein mehr oder weniger breites Spektralgebiet. Dieses Fluoreszenzlicht wird von den durch das erregende Licht getroffenen Teilchen nach allen Seiten hin ausgesandt. Außer festen und flüssigen Körpern zeigen auch einige Gase und Dämpfe Fluoreszenz, so ins besondere Joddampf und Natriumdampf.

Eine Erklärung der Fluoreszenz hat Lommel auf Grund der Theorie der erzwungenen Schwingungen zu geben versucht. Der Versuch ist aber mißglückt: hauptsächlich deshalb, weil es damit nicht gelang, die eigentümliche Verschiebung der Wellenlänge des Fluoreszenzlichtes gegen das erregende Licht zu erklären. Die Theorie der erzwungenen Schwingungen setzt ja gerade ein schwingungsfähiges Resonatorsystem mit fest gegebener Eigenfrequenz voraus, weil sonst keine scharfe Resonanz möglich ist. Ein solcher Resonator kann aber die aufgenommene Energie nur immer als Strahlung mit derselben Frequenz wieder abgeben. Mittels erzwungener Schwingungen allein läßt sich also die Frequenzänderung nicht erklären.

Daß trotzdem bei der Fluoreszenz sicher erzwungene Schwingungen eine Rolle spielen, ist zwar von jeher vermutet worden, aber erst Wood hat dafür den Beweis erbracht, und zwar am Natriumdampf, und weiterhin am Jod- und Quecksilberdampf. Seine Versuche zeigen, daß man durch Erregung mit bestimmten engbegrenzten Spektralbezirken (Licht einzelner scharfer Spektrallinien) ganz bestimmte begrenzte Spektralgebiete als Fluoreszenzstrahlung erhalten kann. Um diese von den gewöhnlichen Fluoreszenzspektren zu unterscheiden, ist der Name „Resonanzspektrum“ gewählt worden. Das Resonanzspektrum des Natriumdampfes, der durch Licht der blauen Kadmiumlinie von der Wellenlänge 480,0 Milliontel Millimeter ($\mu\mu$) erregt wird, besteht z. B. aus einer Anzahl scharfer heller Linien, die in nahezu gleichen Abständen vonein-

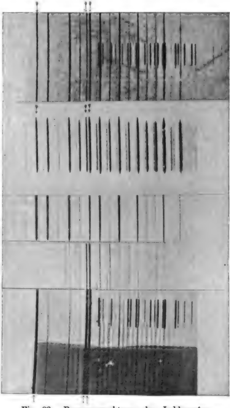

a
b
c
d
e

Fig. 23. Resonanzspektrum des Joddampfes.

ander entfernt im blauen und grünen Teil des Spektrums auftreten. Ganz ähnliche Resultate erhält man mit anderen Erregungslinien. Wirken nun sehr viele erregende Strahlen verschiedener Wellenlängen gleichzeitig, was der Fall ist, wenn man weißes Licht anwendet, so lagern sich die erregten Resonanzlinienspektren übereinander und man bekommt ein aus sehr zahlreichen feinen Linien bestehendes Resonanzspektrum, das bei ungenügender Dispersion des Spektralapparates wie ein kontinuierliches Fluoreszenzspektrum erscheint.

Sehr bemerkenswert ist es aber, daß nicht alle beliebigen Strahlen Resonanz erregen, sondern nur Strahlen bestimmter Wellenlängen. In jedem Falle muß die „Erregungslinie" mit einer Linie des vollständigen Resonanzspektrums zusammenfallen.

Aehnliche und zum Teil noch schönere Resonanzspektren sind am Joddampf und Queckksilberdampf, bei letzterem im ultravioletten Gebiete erhalten worden. Man kann diese Erscheinungen offenbar nur so deuten, daß in den Körperatomen schwingungsfähige Systeme (Elektronengruppen) vorhanden sind, die wie Punktsysteme oder elastische Körper einer ganzen Reihe von Eigenschwingungen mit diskreten, fest gegebenen Frequenzen fähig sind. Die Teile dieser Systeme sind also miteinander irgendwie gekoppelt und die „Resonanzspektren" sind das Resultat erzwungener Schwingungen eines Elementarteils eines solchen Systems, welche infolge der Koppelung auch die anderen Teile des Systems in Schwingungen versetzen.

Die Abbildung Figur 23a bis e, die nach Spektralphotographien von Wood (Physikal. Zeitschr. **12** [1911] S. 1204) hergestellt ist, gibt einen Begriff von dem Aussehen dieser Resonanzspektra. Sie stellt das Jodresonanzspektrum unter verschiedenen Bedingungen dar. Die mit Pfeilen bezeichneten drei Linien sind die erregenden Linien, deren Licht von einer Quecksilberdampfbogenlampe geliefert wird, links die sehr helle grüne Linie mit der Wellenlänge $\lambda = 546{,}1\ \mu\mu$ ($1\ \mu\mu = 1$ Milliontel Millimeter), weiter rechts die beiden gelben Linien $\lambda = 577{,}0\ \mu\mu$ und $\lambda = 579{,}0\ \mu\mu$. 23c ist das von der grünen Linie, 23d das von den beiden gelben Linien allein erregte Resonanzspektrum, das sich hauptsächlich nach dem roten Ende (rechts) des Spektrums hin erstreckt. Die einzelnen Linien dieser Spektren sind ungleich hell, stärkere wechseln mit schwächeren in einem offenbar regelmäßigen Wechsel ab, der wohl durch den inneren Bau des resonierenden Atoms oder Moleküls bedingt, aber vorläufig nicht zu erklären ist. Figur 23b ist die Uebereinanderlagerung beider Resonanzspektra, die entsteht, wenn die grüne und die gelben Quecksilberlinien zusammen erregend wirken; 23a dasselbe aber mit darüber photographiertem Neonspektrum (die kurzen Linien in der Mitte) zur Bestimmung der Wellenlängen. Figur 23e endlich — auch mit überphotographiertem Neonspektrum — ist das von denselben drei Linien erregte Resonanzspektrum, wenn außer dem Joddampf noch eine gewisse Menge Heliumgas in dem Beobachtungsgefäß enthalten ist. Statt des Linienspektrums entsteht ein viel komplizierteres Bandenspektrum, das sich dem durch weißes Licht erregten Fluoreszenzspektrum des Joddampfes im Aussehen nähert.

Literatur. *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Leipzig, Bd. IV (Mechanik) die Artikel* **26: H. Lamb,** *Schwingungen elastischer Systeme;* **10: R. v. Mises,** *Dynamische Probleme der Maschinenlehre;* **27: Th. v. Kármán,** *Festigkeitsprobleme im Maschinenbau;* **6: P. Stäckel,** *Elementare Dynamik.* — *Handbuch der Physik, herausgegeben von Winkelmann, 2. Aufl., Bd. I, 1. Teil, Abschnitt Pendel von* **Auerbach**; *besonders Bd. II, Akustik von* **Auerbach.** — **Lord Rayleigh,** *Theory of Sound. 2nd ed. London 1894; 1. Aufl. übersetzt von Neesen. Braunschweig 1880.* — **W. Hort,** *Technische Schwingungslehre. Berlin 1910.* — **F. Melde,** *Akustik (Leipzig 1883. Insbesondere Kapitel 5.* — **A. Kalähne,** *Mathematisch-physikalische Akustik, 1. Teil. Leipzig 1910.* — **P. Drude,** *Lehrbuch der Optik (Leipzig 1900), d. Kapitel über Lichtdispersion. Ferner desselben Verfassers Artikel über Theorie der Dispersion in Winkelmanns Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. VI (Optik), S. 1316. Leipzig 1906.* — **J. Zenneck,** *Elektromagnetische Schwingungen und drahtlose Telegraphie. Stuttgart 1905.* — **Derselbe,** *Leitfaden der drahtlosen Telegraphie. Stuttgart 1909.* — *2. Aufl. Stuttgart 1913.* **H. A. Lorentz,** *The Theory of Electrons. Leipzig 1909.* — **W. Voigt,** *Magneto- und Elektrooptik. Leipzig 1908.* — **M. Wien,** *Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie* **61** *(1897) S. 161 (Rückwirkung resonierender Systeme).* — **Derselbe,** *Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie* **58** *(1896) S. 725 (Periode, für welche die Amplitude der erzwungenen Schwingung ein Maximum wird) und andere Arbeiten.* — **V. Bjerknes,** *Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie* **55** *(1895) S. 121 (Elektrische Resonanz).* — **A. Oberbeck,** *Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie* **34** *(1888) S. 1041.* — **H. Frahm,** *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft* **12** *(1911) S. 283 (Neuartige Schlingertanks).* — **C. V. Raman,** *The Indian Assoc. for Cultiv. of Science, Bull. Nr. 6. Calcutta 1912. (Experimental Investigation on the Maintenance of Vibrations.)*

A. Kalähne.

Schwingungserregung.

I. Abklingende Schwingungen. 1. Mechanische Systeme. 2. Elektrische Systeme. II. Dauernde Schwingungen. A. Periodische Energiequelle. B. Unperiodische Energiequelle. 1. Allgemeines: a) Labiler Zustand. b) Energieverhältnisse. 2. Reibungskraft: a) Feste Körper. b) Elektrische Systeme. c) Luftströmungen. 3. Andere Kräfte: a) Durch Wärme erzeugte Schwingungen. b) Elektromagnetische Unterbrecher. c) Sonstige periodische Erscheinungen.

Wir haben bei den praktisch vorkommenden Schwingungsvorgängen zweierlei Arten zu unterscheiden: die abklingenden (oder gedämpften) und die dauernden (oder ungedämpften) Schwingungen. Bei den ersteren wird einem System mit einer Eigenschwingung einmalig eine bestimmte Energiemenge mitgeteilt, worauf es sich selbst überlassen bleibt und je nach der Dämpfung mehr oder weniger rasch abklingende Eigenschwingungen mit abnehmender Amplitude ausführt. Die Energie wird durch die Dämpfung allmählich aufgezehrt und das System kommt bald wieder zur Ruhe, wenn ihm nicht vorher von neuem ein Energievorrat mitgeteilt wird. Die angeschlagene Glocke oder Klaviersaite sind Beispiele für solche abklingende Schwingungen.

Die zweite Art der Schwingungen, die dauernden, besitzen praktisch natürlich auch eine Dämpfung, so daß der Ausdruck „ungedämpft" nicht ganz zutreffend ist. Die Amplitude bleibt nur deshalb dieselbe, weil das System dauernd von außen angeregt wird; es erhält im stationären Zustand während jeder Schwingungsdauer von außen ebenso viel Energie nachgeliefert als es durch Dämpfung verliert, so daß der Eindruck einer Eigenschwingung ohne Dämpfung entsteht, besonders wenn die Dämpfung wirklich sehr gering ist und daher nur wenig Energie zugeführt werden muß. Die gestrichene Violinsaite oder das mit dem Finger am Rande geriebene Glas sind Beispiele für dauernde Schwingungen; solange der Bogen oder der Finger gleichmäßig reibt, hört man einen Ton von gleichbleibender Stärke.

I. Abklingende Schwingungen.

1. Mechanische Systeme. Der physikalische Vorgang bei der Erregung frei abklingender Schwingungen ist im Prinzip ohne weiteres einleuchtend. Wir heben ein Pendel seitwärts aus, erteilen ihm also potentielle Energie, oder wir schlagen es in der Ruhelage mit einem Hammer an, erteilen ihm also eine Geschwindigkeit, kinetische Energie oder schließlich ganz allgemein wir bewegen das Pendel irgendwie hin und her und haben ihm dann beim Loslassen sowohl potentielle als auch kinetische Energie mitgeteilt. Dann bleibt das Pendel sich selbst frei überlassen und schwingt hin und her, bis die mitgeteilte Energie sich in den Dämpfungswiderständen verzehrt hat. Bei den schnelleren elastischen Eigenschwingungen ist es notwendig, daß das Loslassen sehr plötzlich erfolgt. Würden wir z. B. mit dem Finger F (Fig. 1) gegen eine straff gespannte Klaviersaite drücken und ihn darauf in der Pfeilrichtung wegbewegen, so würde die Saite so gut wie gar nicht in Schwingungen geraten, da die elastische Energie zwar hervorgerufen aber der Hauptsache nach an den Finger zurückgegeben würde, ohne, wie beim Schwingungsvorgang erforderlich, eine kräftige Beschleunigung der Saite zu erzeugen. Auch wenn wir die Saite zwischen zwei Fingern seitwärts ziehen, müssen wir die Finger sehr rasch öffnen, damit sich die Saite nicht am Finger entlang reibt und dadurch ihre Spannungsenergie wieder verliert. Man bedenke, daß, wenn die Saite 250 Schwingungen pro Sekunde macht, sie nach einer tausendstel Sekunde schon ihre ganze Spannungsenergie in Bewegungsenergie umgesetzt hat. Die Zeit des Loslassens muß klein gegen die Zeit einer Schwingung sein. Sehr schnelle Eigenschwingungen erregt man daher am besten durch plötzliches Losreißen, wie bei der Zither, oder durch einen stoßartigen Schlag wie beim Klavier und der Glocke. Der Stoß ist ganz besonders zur Erregung der Eigenschwingung harter Körper geeignet, denn einerseits sind die Druckkräfte bei ihm sehr groß, die Erregung also kräftig, andererseits ist die Druckzeit außerordentlich klein, so daß die Körper gleich wieder frei sich selbst überlassen sind. Da bei jeder Handhabung mit festen Körpern Stöße unvermeidlich sind, so werden dabei auch stets Eigenschwingungen erregt, die sich durch ihren Schall bemerklich machen. Bei Gummi, Filz und ähnlichen nachgiebigen Körpern ist dagegen die Stoßzeit relativ lang, der Stoßdruck gering, daher entstehen bei ihnen gar keine oder nur sehr tiefe, dumpfe Töne. Den Klavierhämmern gibt man einen dünnen Ueberzug aus Filz, damit einerseits die höheren Obertöne der Saite nicht zu sehr erregt werden, der Ton nicht zu scharf wird, andererseits der Hammer selbst keinen störenden Ton gibt.

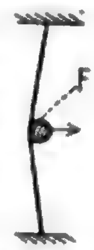


Fig. 1.

2. Elektrische Systeme. Bei elektrischen Systemen entstehen abklingende Eigenschwingungen besonders beim Ein- und Ausschalten. Beim Schließen eines Stromkreises mit einem Kondensator, d. h. beim Aufladen des Kondensators hat die Kondensator-

spannung den in Figur 2 gezeichneten Verlauf. Bei geringer Dämpfung steigt sie anfangs auf den doppelten Wert der Ladespannung E an. Dies ist nicht verwunderlich, da die neue Ruhelage, der geladene Zustand,

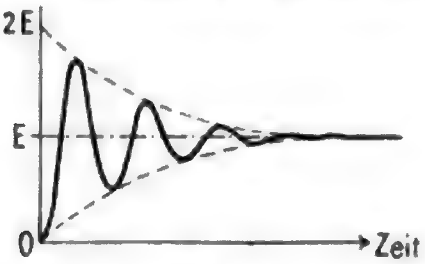


Fig. 2.

die Spannung E ist, die Abweichung aus dieser Ruhelage aber zu Anfang —E beträgt, also nach einer halben Schwingung auf +E über E ansteigen muß. Diese hohe Ueberspannung kann bei schlechter Isolation einen Durchschlag einleiten. Sie selbst dauert freilich meist nur kürzer als $^1/_{1000}$ Sekunde an. Wenn aber einmal ein Durchschlag erfolgt ist, bildet sich leicht ein Lichtbogen aus, der nicht so leicht wieder erlischt. Das Oeffnen eines Stromkreises hat viel Aehnlichkeit mit dem mechanischen Stoß. Wie dort durch die plötzliche Hemmung der Bewegung hohe Druckkräfte entstanden, so bilden sich hier durch die plötzliche Hemmung des Stromes hohe Spannungen an der Ausschaltstelle, die in gleicher Weise Anlaß zu Eigenschwingungen geben können. Kräftige, sehr schnelle Eigenschwingungen. wie man sie z. B. bei der drahtlosen Telegraphie verwendet, erzeugt man am besten durch die Funkenentladung eines Kondensators. Der Funke bildet sich nämlich innerhalb einer außerordentlich kurzen Zeit, einer milliontel Sekunde und weniger aus, so daß er den Strom viel schneller schließt, als es durch einen mechanischen Schaltvorgang geschehen könnte.

II. Dauernde Schwingungen.

A. Periodische Energiequelle.

Die Erregung dauernder Schwingungen ist auch ohne weiteres physikalisch verständlich, wenn wir irgend eine periodisch wirkende Energiequelle besitzen. Streichen wir mit einem engen Kamm über den Rand eines Kartenblattes, so wird das Blatt von jedem Zahn des Kammes ein wenig verbogen und schwingt infolge seiner Elastizität bei jeder Lücke wieder ein wenig zurück. Bei nicht zu langsamer Bewegung entsteht daher ein Ton, der um so höher ist, je schneller die Bewegung erfolgt, je mehr Stöße also auf das Blatt ausgeübt werden. In gleicher Weise entsteht ein Ton, wenn man mit dem Fingernagel über einen geriefelten Bucheinband streicht. Bei Leinwand kommen etwa 4 Riefeln auf einen Millimeter. Bei einer mäßig schnellen Bewegung von etwa 2 Metern pro Sekunde macht der Buchdeckel (und der Fingernagel) also etwa 800 Schwingungen pro Sekunde. Man hört daher einen ziemlich hohen Ton, etwa a_2.

Eine gleichmäßige, beliebig lange andauernde Schwingung erhält man am besten aus einer Rotationsbewegung. Man verwendet z. B. statt des Kammes ein rotierendes Zahnrad. Läßt man statt des Kartenblattes einen Luftstrom seitwärts gegen das Zahnrad wirken, so daß er abwechselnd durch einen Zahn abgedrosselt und durch eine Lücke frei hindurchgelassen wird, erhält man natürlich periodische Luftstöße und einen entsprechenden Ton. Solche Apparate, Sirenen genannt, dienen einerseits zur Erzeugung sehr lauter Töne (Dampfsirenen), andererseits zu experimentellen Untersuchungen, da man die Tonhöhe durch die Umdrehungszahl oder die Zahl der Zähne und die Klangfarbe durch die Form der Zähne leicht in beliebigen Grenzen verändern kann. Vielfach verwendet man statt der Zähne Löcher in der rotierenden Scheibe und statt einer einzigen Ausflußöffnung eine feststehende Scheibe mit einer gleichen Zahl Löcher. Durch Schrägstellen der Löcher kann dann der Luftstrom selbst die bewegliche Scheibe turbinenartig in Rotation versetzen, während man sonst einen besonderen Motor braucht.

Elektrische Schwingungen, Wechselströme, lassen sich durch Rotation von Leitern im Magnetfelde, den gewöhnlichen Dynamomaschinen, oder auch durch rotierende oder oszillierende Unterbrecher erzeugen. Natürlich kann der Wechselstrom auch wieder mechanische Schwingungen erzeugen, z. B. indem er eine Telephonmembran in Bewegung setzt.

Bei all diesen Vorgängen sind Eigenschwingungen entweder überhaupt nicht vorhanden, oder doch nur nebensächlich, da die Energiequelle an sich schon periodisch ist. Diese Periodizität ist einerseits zunächst örtlich vorhanden (die Zähne beim Kamm) und wird durch die Bewegung in eine zeitliche verwandelt (das nacheinander erfolgende Auftreffen der Zähne), oder sie rührt von der Rotation her, die ja auch eine periodische Bewegung ist. Wir müßten eigentlich weiter das Entstehen der Rotationsbewegung untersuchen. Doch sind hier die zahlreichen Anordnungen so bekannt, daß wir davon absehen wollen.

Wirkt die periodische Energiequelle auf ein schwingungsfähiges System, und ist ihre Periode gleich der der Eigenschwingung, so haben wir den Fall der Resonanz (vgl.

den Artikel „Schwingungen. Erzwungene Schwingungen"). Bei geringer Dämpfung des schwingenden Systems ist der ausreichende Antrieb oft so klein, daß uns die Uebertragung der Energie kaum merklich wird. Ein Vibrationstachometer, ein aus einer Reihe abgestimmter Zungen bestehender Kamm, braucht nur irgendwo gegen eine rotierende Maschine gehalten zu werden; die stets vorhandenen kleinen Erschütterungen in der Periode der Rotation reichen aus, die betreffende Zunge zum Mitschwingen zu bringen und dadurch die Umlaufszahl der Maschine anzuzeigen. Bei zwei gut aufeinander abgestimmten Stimmgabeln kann schon durch den Schall in der Luft genügend Energie übertragen werden, um die eine zum Mittönen zu bringen, wenn die andere angeschlagen wird. Das Merkwürdige bei dieser Art der Erregung ist nicht das Entstehen der Schwingungen an sich, sondern nur, daß gelegentlich so kleine Kräfte so starke Schwingungen hervorrufen können. Die Erklärung hierfür liegt darin, daß sich bei der Resonanz die Wirkung einer großen Zahl einzelner Stöße, die im Rhythmus der Eigenschwingung erfolgen, summiert; das schwingende System speichert immer mehr Energie in sich auf, ohne bei schwacher Dämpfung eine merkliche Energiemenge abzugeben.

B. Unperiodische Energiequelle.

1. Allgemeines. Dagegen gibt es eine große Zahl von Fällen, wo dauernde Schwingungen ohne irgendeine periodische Energiequelle gewissermaßen von selbst entstehen. Sie begegnen uns im täglichen Leben so häufig, daß wir uns kaum noch darüber wundern, daß z. B. die Violine beim einfachen Anstreichen einen lauten reinen Ton von sich gibt, ein Zeichen, daß die Saite dauernde regelmäßige Schwingungen ausführt. Das Eigentümliche bei dieser Art der Erregung liegt darin, daß die periodische Bewegung sich selbst erst den nötigen periodischen Antrieb erzeugt, d. h. die unperiodische und daher an sich für eine Schwingung unwirksame Energiequelle wird erst durch die Schwingungen selbst in eine periodische verwandelt. Die Periode der Energiequelle und des schwingenden Systems stimmen dann natürlich von selbst überein.

1a) Labiler Zustand. Eine gewisse Schwierigkeit, freilich mehr theoretischer Art, macht dabei folgende Frage: die Schwingungen sind doch zunächst gar nicht da, wie können sie überhaupt entstehen, wenn sie sich selbst erst erzeugen müssen? Es handelt sich hier um ein dem labilen Gleichgewicht ganz analoges Problem. Auch bei einem auf der Spitze stehenden Ei liegt theoretisch kein Grund vor, daß es umfällt, die Theorie sagt nur, daß schon der geringste Anstoß ausreicht, um es umzuwerfen, weil sich jede Abweichung aus der Gleichgewichtslage von selbst vergrößert; solche geringe Erschütterungen sind aber immer vorhanden, darum bleibt das Ei in Wirklichkeit nicht stehen. Genau so ist es auch bei dem Entstehen von Schwingungen. Eine mit dem Violinbogen gleichmäßig gestrichene Saite müßte theoretisch eine ganz bestimmte Gleichgewichtslage einnehmen, in der die elastische Kraft die Saite gerade so stark zurückzieht, wie die Reibungskraft sie vorwärts zieht. Reiben wir den Violinbogen mit Oel ein, so bleibt die Saite tatsächlich ganz ruhig in dieser Gleichgewichtslage liegen, sie tönt nicht. Bei dem mit Kolophonium bestrichenen Bogen entstehen aber ganz von selbst Schwingungen um diese Gleichgewichtslage, genau wie das Ei ganz von selbst umfällt. Auch hier ist nämlich ein ganz geringer Anstoß praktisch immer vorhanden, er gibt Anlaß zu einer schwachen Eigenschwingung, die sich dann von selbst verstärkt. Wir wollen dies als Labilität gegen Schwingungen bezeichnen. Die Bedingung, wann ein solches Verstärken eintritt und wann nicht, wollen wir sogleich ableiten, vorher nur noch kurz auf einen weiteren analogen Punkt hinweisen. Wenn wir ein Ei auf eine weiche Unterlage stellen oder es nach dem Beispiel von Kolumbus ein wenig eindrücken, so bleibt es auf der Spitze stehen. Ein etwas stärkerer Anstoß bringt es aber auch dann noch zum Umfallen. Etwas ganz Analoges kann man vielfach auch bei der Labilität gegen Schwingungen beobachten. Der Zustand ist gegen kleine Schwingungen stabil, so daß zunächst keine Schwingungen entstehen. Erst wenn aus irgendwelcher Ursache größere Schwingungen erregt werden, können sie sich selbst unterhalten und dauern dann an. Ein Uhrpendel ist ein grobes Beispiel dafür: es setzt einen Antriebsmechanismus erst in Tätigkeit, wenn die Ausschläge ein gewisses Maß überschreiten.

1b) Energieverhältnisse. Wir wollen jetzt untersuchen, wann eine äußere Einwirkung, die wir mechanisch als auf das System wirkende Kraft bezeichnen, Schwingungen verstärken kann. Wir müssen also die Bedingung dafür aufstellen, daß diese Kraft auf das schwingende System Energie überträgt. Die Energie E ist nun gleich Kraft K mal Weg a; unter Weg die Verschiebung des Angriffspunktes der Kraft in Richtung der Kraft verstanden. Aendert sich die Kraft auf dem Wege, so muß man jedes Wegelement da mit der dort herrschenden Kraft K multiplizieren und alle Produkte summieren, was man durch die Formel $E = \int K da$ ausdrückt. Die Summierung

muß über eine ganze Schwingungsperiode ausgeführt werden. Das Resultat übersieht man am besten graphisch (Fig. 3), indem man nach rechts den Weg *a*, nach oben die zu jedem Wegstück *da* gehörige Kraft *K* als Kurve aufträgt. Der ganze schraffierte Flächeninhalt stellt dann die Summe der Produkte *Kda* dar. Man hat dabei zunächst von $a = 0$ bis zum maximalen Ausschlag a = A zu summieren, wir wollen dies den Hinweg nennen. Dann müssen wir aber weiter auch über den Rückweg summieren. Wechselt dabei die Kraft ihre Richtung nicht, so geschieht die Rückbewegung entgegen der Kraft, es geht wieder Energie verloren. Wir müssen dann die zweite Fläche, die in der Figur 3 wagerecht schraffiert ist, von der ersten abziehen und erhalten als gesamte Energie den von der Hinweg- und Rückwegkurve eingeschlossenen Flächeninhalt. Wäre die Kraft auf dem Rückwege größer gewesen als auf dem Hinwege, so würden wir eine der Figur 4 entsprechende Energiefläche erhalten haben. Die gesamte Energie wäre dann negativ, durch Einwirkung der äußeren Kraft wäre dem schwingenden System Energie verloren gegangen. Man erkennt leicht, daß ganz allgemein ein Umlaufssinn in Richtung des Uhrzeigers positive, entgegen dem Uhrzeiger negative Energie bedeutet. Die Bedingung für positive Energie kann man demnach auch so ausdrücken: Die in Richtung des Hinwegs wirkende Kraft muß auf dem Hinwege im Mittel größer sein als auf dem

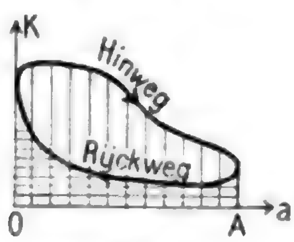


Fig. 3.

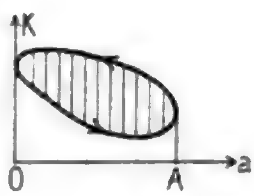


Fig. 4.

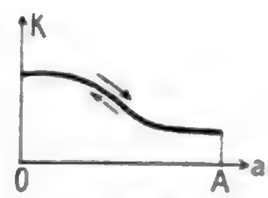


Fig. 5.

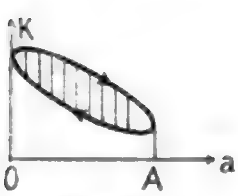


Fig. 6.

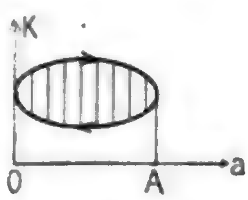


Fig. 7.

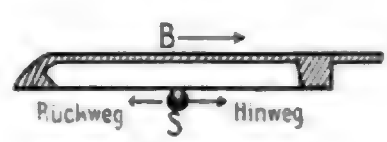


Fig. 8.

Rückwege, was auch rein physikalisch einleuchtet. Daraus folgt zunächst, daß die äußere Kraft nicht dauernd konstant sein darf; denn dann wird die Energie $E = 0$. Die konstante Schwerkraft z. B. gibt an einen auf- und abtanzenden Körper keine Energie ab. Die Kraft darf aber auch nicht überall auf dem Rückwege ebenso groß sein wie an denselben Stellen auf dem Hinwege (Fig. 5) oder, wie man dies ausdrückt, die Kraft darf nicht eindeutig von dem Wege abhängen, denn auch dann wird die Energie null. Dieser Satz ist für alle periodischen Bewegungen, auch wenn es sich nicht um Eigenschwingungen handelt, gültig, z. B. auch für die hin- und hergehende Kolbenbewegung bei der Dampfmaschine. Für diese sagt er aus, daß die Steuerung, die die Größe der Dampfkraft reguliert, nicht zwangläufig durch die Kolbenbewegung angetrieben werden kann, die Stellung der Steuerung muß auf dem Hinwege eine andere sein als an derselben Stelle auf dem Rückwege. Sonst kann niemals eine Hin- und Herbewegung eintreten.

Aendert sich der Ausschlag a sinusförmig und ist auch die äußere Kraft sinusförmigen Schwankungen unterworfen (etwa um einen konstanten Mittelwert, der für die Energie, wie oben gezeigt, nicht in Betracht kommt), so wird der die Energie darstellende Flächeninhalt eine Ellipse (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegungen"). Diese wird im Uhrzeigersinne durchlaufen (Fig. 6), wenn die antreibende Kraft gegen die Bewegung eine positive Phasenverschiebung hat, ihr im Schwingungszustand voreilt. Nur dann wird also dem schwingenden System Energie zugeführt. Im anderen Falle wird die Fläche entgegen dem Uhrzeigersinne durchlaufen, es wird der Schwingung Energie entzogen. Ist der Phasenunterschied null, so artet die Ellipse in eine gerade Linie aus, der Flächeninhalt und somit auch die Energie wird null. Bei einem Phasenunterschiede von $^1/_4$ Periode liegt die Ellipse in der Hauptlage (Fig. 7), die zugeführte Energie wird ein Maximum. Es ist daher am günstigsten, wenn sich die Kraft gerade in den Totpunkten am stärksten ändert, wo der Ausschlag einen Augenblick konstant ist; bei der Dampf-

maschine bewegt sich in der Tat die Steuerung dort am stärksten.

2. Reibungskraft. 2a) Feste Körper. Da sich bei der sinusförmigen Bewegung die Geschwindigkeit auch sinusförmig und mit einer Phasenverschiebung von $^1/_4$ Periode gegen den Ausschlag ändert, so folgt, daß die zugeführte Energie ein Maximum wird, wenn Kraft und Geschwindigkeit in Phase sind, die antreibende Kraft also immer um so größer wird, je größer die Geschwindigkeit ist. Kräfte, die von der Geschwindigkeit abhängen, müssen daher zur Erzeugung von Schwingungen besonders geeignet sein. Eine solche Kraft ist aber die Reibung. Die gewöhnliche Reibung bildet freilich eine Dämpfung der Schwingungen, da sie immer der Geschwindigkeit entgegen wirkt, also sowohl auf dem Hin- als auf dem Rückwege Energie verbraucht. Wenn aber ein schwingendes System (Violinsaite) S (Fig. 8) mit einem anderen bewegten Körper (Violinbogen) B in Berührung steht, so ist die reibende Kraft nur von der Relativbewegung zwischen beiden abhängig. Schwingt nun S hin und her, so ist die Relativgeschwindigkeit, d. h. die Differenz beider Geschwindigkeiten auf dem Hinwege bei gleicher Bewegungsrichtung von B und S kleiner als auf dem Rückwege. Soll nun auf dem Hinwege die Reibungskraft größer sein als auf dem Rückwege, so ist das nur möglich, wenn die Reibungskraft bei größerer Geschwindigkeit kleiner, oder bei kleinerer Geschwindigkeit größer wird. Dies ist also die notwendige Bedingung dafür, daß durch Reibung Schwingungen unterhalten werden. Ist sie auch für ganz kleine Schwingungen erfüllt, so entstehen die Schwingungen ganz von selbst, der Zustand ist dann gegen Schwingungen labil.

Während nun bei einer guten Schmierung mit Oel oder dgl. die Reibungskraft stets mit der Geschwindigkeit zunimmt, also Schwingungen weder entstehen noch unterhalten werden können, ist bei der trockenen Reibung vielfach das Gegenteil der Fall. Besonders kann hier die Reibungskraft bei der Geschwindigkeit null, dem Zusammenhaften zweier Körper, viel größere Werte annehmen, als bei irgendeiner Geschwindigkeit, d. h. wenn die Körper einmal ins Gleiten gekommen sind. Das kann man sehr häufig beobachten, ganz besonders stark, wenn man eine harzige Masse, etwa eine Politur, mit einem Lappen durch Reiben aufträgt. Gerade dieses Mittel ist es aber auch, durch das man außerordentlich kräftige Schwingungen erregen kann. Legt man um einen in der Mitte eingespannten Glasstab ein mit Kolophonium bestrichenes Stück Zeug und zieht es kräftig und schnell von der Mitte bis zum Ende des Stabes, so erregt man die longitudinalen Eigenschwingungen des Stabes außerordentlich stark, so daß es vorkommen kann, daß der Stab in lauter ringförmige Stücke zerspringt. Zum mindesten gibt er einen sehr lauten (hohen) Ton von sich. Auch Metall- und Holzstäbe lassen sich auf die gleiche Weise in kräftige Eigenschwingungen versetzen. Mit dem mit Kolophonium bestrichenen Violinbogen kann man nicht nur eine Saite, sondern auch Stimmgabeln, Gläser und Glocken, Platten, kurz überhaupt so ziemlich alle Körper in Eigenschwingungen versetzen, wenn sie nur so befestigt sind, daß die Eigenschwingungen nicht zu stark gedämpft werden und man mit dem Violinbogen irgendwelche schwingende Teile in ihrer Schwingungsrichtung bestreichen kann. Der Vorgang spielt sich so ab, daß der schwingende Körper auf dem Hinwege mehr oder weniger am Bogen anhaftet, auf dem Rückwege aber längs des Bogens entlang gleitet, wodurch er zwar etwas gedämpft wird, aber nicht so viel, wie er auf dem Hinwege angetrieben wurde.

Solche Eigenschwingungen und dadurch erzeugte Töne entstehen auch unbeabsichtigt fast überall bei der trockenen Reibung. Schlecht geschmierte Türen oder Räder kreischen in ihren Lagern; Stiefel, Möbel und Baumäste knarren, wenn sie sich aneinander reiben, auch wenn sich beim Drücken ihre Teile ein wenig elastisch gegeneinander bewegen. Ueberhaupt werden fast sämtliche Geräusche, die bei der Bewegung fester Körper überall entstehen, soweit es sich nicht um die früher erwähnte Erregung durch Stöße handelt, durch die trockene Reibung erzeugt. Daß die Töne meist unangenehm knarrend oder kreischend werden, rührt daher, daß im allgemeinen die Eigenschwingungen beider sich reibender Körper erregt werden und auch andere benachbarte Teile mit in Schwingungen versetzt werden, die dann wieder auf den erregenden Körper zurückwirken. Da die Frequenzen dieser verschiedenen Eigenschwingungen im allgemeinen weder nahezu gleich sind, noch in einfachen harmonischen Verhältnissen stehen, so entstehen sehr schnelle unregelmäßige Schwebungen, die gerade das charakteristische Merkmal der knarrenden und kreischenden Geräusche sind. Nur wenn der eine reibende Körper nicht mitschwingt, z. B. aus einem Lappen oder schlaff gespannten, weichen Violinbogen besteht und der andere Körper in seiner Eigenschwingung frei schwingen kann, entstehen wohlklingende Töne. — Gibt man in ein kreischendes Lager etwas Oel, so hört der Ton auf: die Flüssigkeit drängt sich vermöge ihrer kapillaren Eigenschaften zwischen die festen Lagerteile, so daß die

Achse gleichsam in Oel schwimmt. Die Reibungskraft ist dann nicht mehr bei kleineren Geschwindigkeiten größer, sie nimmt im Gegenteil mit der Geschwindigkeit zu. Es können dahee keine Töne mehr entstehen. Das gilt freilich nur bei guten glatten Lagern, bei denen die Flüssigkeit die sich reibenden Teile wirklich überall voneinander trennt. Bei rauhen und aufgeriebenen Lagern hilft alles Oelen nichts, da die hervorspringenden Teile die Flüssigkeit wegdrücken und wieder eine „trockene“ Berührung der festen Teile herbeiführen.

Da es meistens, wenn auch nicht immer, die größere Reibung der Ruhe, das Anhaften, ist, das die Schwingung erregt, so muß das schwingende System zunächst einen Anstoß erhalten, der es auf die gleiche Geschwindigkeit wie die des reibenden Körpers bringt. Ist diese Geschwindigkeit groß, muß der Anstoß kräftig sein. Das System ist dann gegen kleine Schwingungen stabil. Beim Violinbogen kann man diesen Anstoß absichtlich beim ersten Einsetzen gleich mit erteilen; das Erregen der Töne erfordert daher eine gewisse Uebung. Bei Türangeln u. dgl. geben kleine Unregelmäßigkeiten den ersten Anstoß; auch sind hier die Zapfengeschwindigkeiten meist sehr klein. Bei schnelleren Bewegungen entstehen auch vielfach keine Schwingungen mehr, oder aber höhere Töne, denen größere Eigengeschwindigkeiten bei gleichem Ausschlage entsprechen.

Dem Anwachsen der Schwingungen zu immer größeren Amplituden ist dadurch eine Grenze gesetzt, daß die Schwingungen stark gedämpft werden, sobald ihre Eigengeschwindigkeit größer wird als die des reibenden Körpers, denn dann wirkt ja die Reibungskraft nicht nur auf dem Rückwege, sondern auch auf dem Hinwege der Bewegung entgegen. Daraus ergibt sich die paradoxe Folgerung, daß man Saiten und ähnliche schwingende Körper mit sinusförmig verteilten Amplituden bei gleicher Geschwindigkeit des Bogens in stärkere Schwingungen versetzen kann, wenn man sie statt in der Mitte in der Nähe eines Knotenpunktes anstreicht. Dieser Punkt erreicht dann die der Grenzgeschwindigkeit entsprechende Amplitude, während die Saitenmitte entsprechend der sinusförmigen Verteilung der Amplitude wesentlich stärker schwingt. Freilich tritt die Selbsterregung an sich immer schwerer ein, je mehr man sich dem Knotenpunkt nähert.

2b) Elektrische Systeme. Diesen Reibungsvorgängen vollkommen analog ist bei elektrischen Systemen das Entstehen von Schwingungen beim tönenden Lichtbogen (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung“). Schaltet man parallel zu einem Gleichstromlichtbogen L (Fig. 9) einen aus Selbstinduktion und Kapazität bestehenden Schwingungskreis, so werden dessen Eigenschwingungen ganz von selbst erregt, es fließt in diesem Kreise ein Wechselstrom, der sich im Lichtbogen dem Gleich-

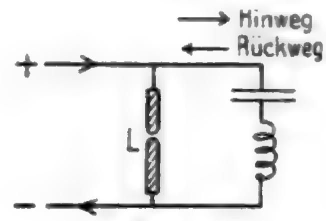


Fig. 9.

strom überlagert und sich durch einen lauten Ton von der Frequenz der elektrischen Eigenschwingung kundgibt. Da der mechanischen Geschwindigkeit der elektrische Strom, der mechanischen Kraft die elektrische Spannung entspricht, lautet hier die analoge Bedingung dafür, daß ein Stromleiter elektrische Schwingungen verstärken kann: Die Gegenspannung des Leiters muß bei größerem Strome kleiner oder bei kleinerem Strome größer werden. Das trifft in der Tat beim Lichtbogen zu. Besonders wird auch hier die Gegenspannung beim Strome null, also wenn der Lichtbogen erlischt, wesentlich größer als beim Stromdurchgang. Es findet dann auch eine Art „Anhaften“ des Schwingungsstromes an den Gleichstrom statt. Im einzelnen verläuft der Vorgang so, daß der Lichtbogen zeitweise erlischt. Der Gleichstrom wird dann gleich dem Schwingungsstrom und lädt den Kondensator auf. Die Spannung wird immer größer, bis das „Losreißen“, das Wiederzünden des Lichtbogens, erfolgt, und der Kondensatorkreis zurückschwingt, d. h. sich durch den Lichtbogen entläd. Man nennt dies Schwingungen zweiter Art. Dagegen können auch Schwingungen erster Art entstehen, bei denen der Lichtbogen nicht erlischt, also nur die abnehmende Spannung bei zunehmender Stromstärke, die sogenannte fallende Charakteristik, die Verstärkung der Eigenschwingungen bewirkt. Diese Schwingungen erster Art müssen sich sogar immer zuerst ausbilden, wenn die Schwingungen von selbst entstehen. Meist wachsen sie dann freilich immer stärker an, bis der Schwingungsstrom gleich dem Gleichstrom wird, der Lichtbogen also beim Hinschwingen erlischt. Ein weiteres Anwachsen würde ein Wiederzünden des Lichtbogens auf dem Hinwege bedingen, und wie bei den Reibungsschwingungen eine Gegenkraft auch auf dem Hinwege hervorrufen. Es tritt daher nur bei schwacher Dämpfung und hoher anfänglicher Aufladung ein (Schwingungen dritter Art)

Zum „Anhaften“, d. h. zum Auslöschen ist eine gewisse Zeit nötig. Die Entladungsbahn muß sich etwas abkühlen, sonst zündet der Lichtbogen sofort wieder. Dies Abkühlen wird beschleunigt, wenn der Lichtbogen in Wasserstoff brennt, der sich durch große Wärmeleitung auszeichnet. Sehr schnelle Eigenschwingungen lassen sich daher nur durch einen in Wasserstoff brennenden Lichtbogen anregen, ähnlich wie ein Anhaften der Violinsaite nur beim Bestreichen des Bogens mit Kolophonium eintritt.

Eine fallende Charakteristik, sinkende Gegenspannung beim Vergrößern der Stromstärke besitzen außer dem Lichtbogen auch die meisten übrigen Gasentladungen, z. B. Geißlersche Röhren, ferner die Nernstlampe und einige Arten von Dynamomaschinen. Tatsächlich wurde bei allen diesen das selbständige Entstehen von Schwingungen experimentell festgestellt.

2c) Luftströmungen. Kehren wir wieder zu den mechanischen Schwingungen zurück. Hier ist noch eine große Klasse von Tönen, d. h. Schwingungen zu erwähnen, die durch die Bewegung der Luft entstehen. Es handelt sich auch hier um labile Zustände, die durch reibungsähnliche Erscheinungen, besonders das Mitreißen der ruhenden Luft und die Wirbelbildung hervorgerufen werden.

Bei der Orgelpfeife (Fig. 10) und dem Anblasen einer Flasche mit dem Munde (Fig. 11) bläst ein Luftstrom über eine

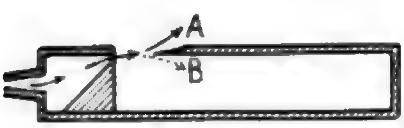


Fig. 10.

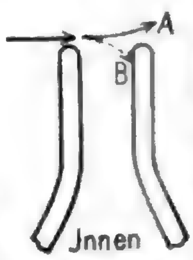


Fig. 11.

Oeffnung hinweg. Schwingt die Luft aus dem Innern heraus, so wird dieser Luftstrom mehr nach außen abgelenkt (A), reißt also die Luft aus dem Innern nach außen mit sich. Schwingt die Luft umgekehrt ins Innere hinein, so wird der Luftstrom zum Teil mit hinein gebogen, verstärkt also das Strömen ins Innere. Eine irgendwie vorhandene Eigenschwingung der Luftsäule in der Pfeife oder Flasche wird also durch den vorbeiströmenden Luftstrom zu stärkeren Schwingungen angeregt; besonders günstig ist offenbar die Anordnung bei der Orgelpfeife. Es entstehen daher ganz von selbst oder nach einem kleinen Anstoße die Eigenschwingungen der Luftsäule, die zu immer stärkeren Schwingungen anwachsen. Eine Grenze für dies Anwachsen wird erreicht, wenn die Geschwindigkeit der ein- und ausströmenden Luft etwa gleich der Geschwindigkeit des Blasestromes wird, da dann das Mitreißen aufhört. Bei kräftigem Blasestrom, wie z. B. bei der Dampfpfeife wachsen die Schwingungen zu außerordentlicher Lautstärke an.

Es sei noch bemerkt, daß der Nutzeffekt, das Verhältnis der in Schall umgewandelten zu der ursprünglich zum Blasen oder Streichen aufgewandten Energie außerordentlich gering ist. Selbst bei guten Orgelpfeifen, wo er am besten zu messen ist, beträgt er nur wenige Prozent. Bei der Violine und anderen Schallerzeugern dürfte er noch geringer sein. Daß wir trotzdem oft sehr laute Töne hören, liegt an der enormen Empfindlichkeit unseres Ohres. Man hat ausgerechnet, daß die Energie eines um einen Zentimeter herabsinkenden Wassertropfens ausreichen würde, um viele 1000 Jahre ununterbrochen eine Schallempfindung im Ohre zu erzeugen. Wenn also die in Schall umgewandelte Energie auch sehr gering ist, so reicht sie doch aus, einen als laut empfundenen Ton zu bilden.

Von den übrigen zahlreichen Schwingungen, die durch bewegte Luft hervorgerufen werden, seien noch die Schneiden- und die Ausflußtöne erwähnt. Das Pfeifen des Sturmes im Tauwerk oder sein Heulen durch enge Tür- und Fensterspalten sind Beispiele dafür. Auch das gewöhnliche Flöten mit dem Munde ist ein Ausflußton. Das Entstehen dieser Schwingungen ist wieder auf einen labilen Zustand zurückzuführen. Das ruhige gleichmäßige Strömen der Luft um einen festen Körper herum ist nur bei ganz kleinen Geschwindigkeiten stabil. Bei größerer Geschwindigkeit bilden sich infolge der Reibung der Luft an dem festen Körper Wirbel aus, die periodischen Charakter besitzen. Bei einer im Winde flatternden Flagge (Fig. 12) kann man die


Fig. 12.

wellenartigen Schwingungen oft gut verfolgen. Es handelt sich hier also im Gegensatz zur Orgelpfeife zunächst nicht um Anregung einer Eigenschwingung; daher hat auch die Periodenzahl, die Tonhöhe keine bestimmte Größe, sondern ist stark von der Intensität abhängig. Mit wachsender Stärke wird das Pfeifen und Heulen des Windes höher, und wenn ein Pneumatik platzt, wird der anfangs pfeifende hohe Ausflußton mit abnehmendem Druck tiefer. Vielfach wirken freilich irgendwelche Eigenschwingungen

regulierend auf die Tonhöhe ein, beim Pfeifen mit dem Munde gerät die Luft in der Mundhöhle in Resonanz, so daß wir durch deren Veränderung auch die Tonhöhe ändern können. Bei der Mundharmonika bestimmen die mitschwingenden Metallzungen die Frequenz, bei der Aeolsharfe die Drähte. Das Singen der Telephondrähte bei schwachem Winde ist die gleiche Erscheinung. Auch in fließendem Wasser eingerammte Pfähle zeigen oft eine zitternde, schwingende Bewegung. Die Ursache ist durchaus nicht etwa eine Unregelmäßigkeit in der Strömung an sich; im Gegenteil singen die Telephondrähte nur bei ganz gleichmäßigem, schwachem Winde. Auch hat man festgestellt, daß die Schwingungsbewegung senkrecht zur Strömungsrichtung der Luft oder des Wassers vor sich geht. Man kann sich den Antrieb wohl so vorstellen, daß sich wie bei der Flagge abwechselnd ein Wirbel auf der linken und auf der rechten Seite ausbildet, und daß dies Umspringen der Wirbel, das an sich auch von selbst eintritt, durch die Schwingungsbewegung in den richtigen Rhythmus gebracht wird.

3. Andere Kräfte. 3a) Durch Wärme erzeugte Schwingungen. Außer den Reibungsvorgängen können auch Wärmewirkungen die selbsttätige Anregung zu Schwingungen bilden. Am bekanntesten sind die singenden Flammen, auch chemische Harmonika genannt. Führt man in ein aufrecht stehendes Rohr R (Fig. 13) eine kleine Flamme F ein, so hört man plötzlich einen lauten Ton und sieht, wie die Flamme länger und dunkler wird. In einem bewegten Spiegel erscheint die Flamme abwechselnd länger und kürzer und zwar in der Periode des Tones. Diese Tonhöhe entspricht ferner der Eigenfrequenz des weiten Rohres, wenn man es als beiderseits offene Pfeife betrachtet. Die Verstärkung und damit auch das Entstehen dieser Eigenschwingungen kommt dadurch zustande, daß die im Schwingungsknoten zusammengedrückte Luft durch die Flamme erwärmt wird und sich daher mit größerer Heftigkeit ausdehnt, als wenn sie kalt geblieben wäre. Auch bei den alten Heißluftmotoren wird ja der Kolben dadurch hin- und hergetrieben, daß die eingeschlossene Luft kalt zusammengedrückt und nach Erwärmen wieder ausgedehnt wird. Nur sind dort besondere Anordnungen für das rechtzeitige Erwärmen und Abkühlen getroffen, während sich hier die Schwingung von selbst so einstellt; sonst würde sie eben nicht entstehen. Der labile Zustand bringt es mit sich, daß irgendeine Art der Schwingung, die entstehen kann, auch wirklich entsteht, gerade wie ein Körper, wenn er nach irgendeiner Richtung umfallen kann, auch wirklich umfällt. Man kann die singenden Flammen leicht so einstellen, daß sie gegen kleine Schwingungen stabil sind. Sie fangen dann von selbst nicht an zu singen. Wenn man sie aber stärker anregt, z. B. durch Resonanz, indem man ihren Eigenton anstimmt, bleiben sie dauernd in Schwingungen. Diese Art der Anregung ist besonders amüsant, da die Flammen auf alle anderen Töne nicht reagieren, da diese sich nicht durch Resonanz zu einem hinreichenden Anstoß verstärken. Das Flackern der kleinen Flamme selbst ist für die Erregung der Schwingungen unwesentlich. Man kann nämlich die Flamme auch durch ein glühendes Stück Kohle oder durch ein elektrisch geheiztes Drahtnetz ersetzen; es kommt also nur auf die Heizwirkung an. Dagegen ist ein einseitiger Luftstrom, der sich bei senkrechtem Rohr von selbst durch die Erwärmung von unten nach oben ausbildet, für die Erregung erforderlich. Er bewirkt, ähnlich wie die einseitige Streichgeschwindigkeit bei den Reibungsschwingungen, daß die resultierende Geschwindigkeit der mit der Heizquelle in Berührung kommenden Luft auf dem Hin- und Rückwege der Schwingungen nicht gleich groß ist.

Ein anderer, durch Wärme von selbst in Schwingungen geratender Apparat ist der Trevelyansche Wackler. Auf einer Unterlage A (Fig. 14), am besten aus Blei, liegt



Fig. 13.

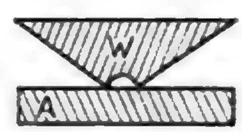


Fig. 14.

ein Metallkörper B der Wackler, mit zwei parallelen Schneiden in geringem gegenseitigen Abstand auf. Sobald man den Wackler erhitzt, schwingt er schnell von einer Schneide auf die andere hin und her und läßt dabei einen entsprechenden Ton erschallen. Die Wirkungsweise beruht wie bei den singenden Flammen darauf, daß beim Zusammenstoßen an der Berührungsstelle ein Teil der Wärme auf die Unterlage übergeht, so daß diese den Wackler stärker zurückwirft, als wenn sie kalt geblieben wäre.

Aehnlich können auch an losen Kontakten beim Durchgang eines elektrischen Stromes Schwingungen und Töne auftreten, indem der elektrische Strom jedesmal beim Berühren geschlossen wird, somit die Kontaktstelle erwärmt und wie oben den losen

Körper stärker zurückwirft. Das Rauschen der Mikrophone bei zu starker Strombelastung ist auf einen solchen Vorgang zurückzuführen.

3b) Elektromagnetische Unterbrecher. Bei den elektromagnetischen Unterbrechern, z. B. der gewöhnlichen Klingel, werden die Schwingungen auch durch selbsttätiges Schließen und Oeffnen des elektrischen Stromes durch den Schwingungsvorgang selbst unterhalten. Nur wird die durch den Strom erzeugte magnetische Anziehungskraft zum Antrieb benutzt. Wird der Strom der Batterie B (Fig. 15) bei S geschlossen, so zieht der Elektromagnet E seinen Anker A an. Dadurch wird aber der Kontakt K geöffnet, so daß der Anker wieder zurückschwingt und dabei den Kontakt wieder schließt. so daß sich das Spiel von neuem wiederholt. Bei dieser üblichen Erklärungsweise wird außer acht gelassen, daß sich der Anker auf dem Hinwege unter dem Einfluß der Magnetkraft auch eine gewisse Strecke bewegen muß; sonst würde keine Energie abgegeben. Dann müßte aber die Magnetkraft auch auf dem Rückwege und zwar ebenso lange bremsend wirken, da ja der Kontakt bei derselben Ankerstellung geschlossen wie geöffnet wird. Die Magnetkraft würde etwa dieselbe Wirkung wie ein federnder Anschlag haben. Das Kraft-Weg-Diagramm (Fig. 16) würde eine

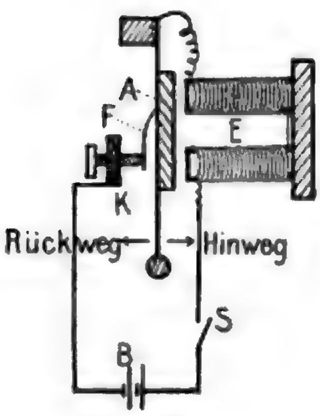


Fig. 15.

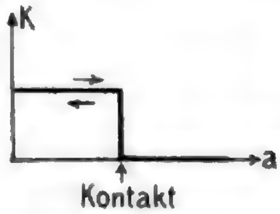


Fig. 16.

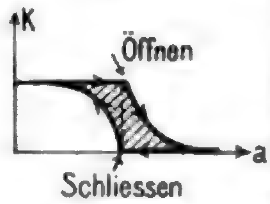


Fig. 17.

gebrochene Linie ohne Flächeninhalt bilden; es würde also insgesamt keine Energie abgegeben werden. Es müssen daher noch andere, für das Zustandekommen der Schwingungen wesentliche Ursachen mitspielen, die bewirken, daß die Anzugskraft nicht eindeutig von der Ankerstellung abhängt, sondern auf dem Hinwege beim Oeffnen des Kontakts länger, auf dem Rückwege beim Schließen des Kontaktes kürzer wirkt, d. h. in beiden Fällen die Kraftänderung später als die Kontaktänderung erfolgt. Diese verzögernden Ursachen werden zum Teil durch die Selbstinduktion des Stromes und die Hysteresis und Wirbelstrombildung im Eisen gebildet, die bewirken, daß die Magnetkraft beim Schließen des Kontaktes erst allmählich auf ihre volle Stärke anwächst und beim Oeffnen noch eine kleine Zeit lang nachwirkt, ehe sie ganz verschwindet. Das Kraft-Weg-Diagramm erhält dadurch das in Figur 17 gezeichnete Aussehen, schließt also einen im Uhrzeigersinn umlaufenen Flächeninhalt ein. In gleicher Weise wirken nicht ganz saubere Kontaktflächen, die den Strom erst schließen, wenn der Kontaktdruck eine gewisse Größe erreicht hat. Schließlich leistet die kleine meist vorhandene Ansatzfeder F (Fig. 15) dieselben Dienste, die mit in Schwingungen gerät und dadurch beim Oeffnen länger am Kontakt liegen bleibt, beim Schließen sich etwas später anlegt. Diese Verzögerungen sind also für das Arbeiten der Unterbrecher unbedingt erforderlich. Bei langsamen Schwingungen und schlechter Einregulierung reichen sie oft nicht aus. Es bilden sich dann an der Unterbrechungsstelle dauernd kleine Fünkchen, ohne daß eine richtige Schwingung zustande käme.

3c) Sonstige periodische Erscheinungen. Für sehr langsame periodische Stromunterbrechungen, wie man sie z. B. als Blinklicht bei der elektrischen Reklamebeleuchtung verwendet, benutzt man vielfach die Heizwirkung des Stromes zur Kontaktabgabe, da man diese leicht sehr weitgehend verlangsamen kann. Ein durch den Strom geheizter Körper dehnt sich aus und öffnet dabei in irgendeiner Weise den Strom. Dann kühlt er sich von selbst wieder ab und schließt den Strom wieder. Durch Sperrvorrichtungen ist dafür gesorgt, daß das Schließen erst erfolgt, wenn der Körper sich ganz abgekühlt hat.

Aehnliche periodisch wirkende Mechanismen lassen sich unschwer ersinnen, besonders elektrisch betriebene, da das Schließen und Oeffnen eines Stromes überaus einfach ist. Mechanische Steuerungen und veränderliche Kuppelungen verursachen oft größere Schwierigkeiten, lassen sich dafür aber auch viel mannigfaltiger ausführen. Man denke nur an die zahlreichen Steuerungsarten der Dampfmaschinen. Die nötige Verzögerung, die die eindeutige Abhängigkeit der Kraft vom Ausschlag beseitigt, ist meist schon ein wenig von selbst vorhanden. Sonst muß sie künstlich herbeigeführt werden. Bei der Dampfmaschine geschieht dies bekanntlich dadurch, daß die Steuerung durch das Schwungrad angetrieben wird, und die Steuerungsstangen gegen die Kolbenstangen um etwa $^1/_4$ Umdrehung versetzt ist.

Fast sämtliche Kraftmaschinen sind mit

selbsttätigen Regulatoren versehen, die die Maschine bei zu schnellem oder zu langsamem Gang immer wieder in den normalen Zustand zurückführen sollen. Diese Regulatoren besitzen aber eine gewisse Trägheit, sie brauchen eine gewisse Zeit, um den Kraftzufluß zu verändern. Dadurch ist auch hier die Möglichkeit zu Eigenschwingungen gegeben. Der Bewegungszustand der Maschine ist der verallgemeinerte Ausschlag dieser Schwingung; er wird durch die normale Regulatortätigkeit immer wieder in die Nullage zurückgetrieben, schießt aber infolge der Regulatorträgheit über die Nullage heraus. Bei falsch bemessenen Regulatoren können auch hier von selbst Eigenschwingungen entstehen, so daß die Maschine immer abwechselnd schneller und langsamer läuft, d. h. Pendelungen um ihren normalen Zustand ausführt. Ein näheres Eingehen auf die nicht ganz leichte Theorie dieses Vorganges würde aber zu weit führen.

Literatur. **Winkelmann**, *Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. II, Akustik von* **F. Auerbach**, *1909.* — **H. Barkhausen**, *Das Problem der Schwingungserzeugung. Leipzig 1907.* — **H. Busch**, *Stabilität, Labilität und Pendelungen in der Elektrotechnik. Leipzig 1912.* — **W. Duddel**, *Electrican, 46, 269, 1900. (Tönender Lichtbogen).* — **W. Kaufmann**, *Annalen der Physik, 2, 158, 1900. (Labile elektrische Zustände.)* — **Trevelyan**, *Annalen der Physik, 24, 466, 1832. (Wackler).* — **Deluc**, *Nouv. Idées de Météorologie, 1787. (Singende Flammen).*

H. Barkhausen.

Scoleciden.

So wird zusammenfassend eine größere Gruppe der Würmer bezeichnet, die durch den Mangel der Leibeshöhle und ein massiges Körperparenchym ausgezeichnet sind, weswegen sie auch parenchymatöse Würmer genannt werden (vgl. die Artikel „Würmer" und „Plathelminthen").

Scrope

George Julius Poulett.

Geboren am 10. März 1797 in London als zweiter Sohn des Großkaufmanns J. Poulett Thomson von Waverley Abbey in Surrey; gestorben am 19. Januar 1876 in Fairlawn bei Cobham in Surrey; begraben zu Stoke d'Abernon. Er ging in Harrow zur Schule, besuchte kurze Zeit das Pembroke College zu Oxford und seit 1816 das St. Johns College zu Cambridge, wo er 1821 Bachelor of Arts wurde. Durch E. D. Clarke und Sedgwick wurde er frühzeitig zu geologischen Studien angeregt. So studierte er gelegentlich eines Aufenthaltes in Neapel (1817 bis 1818) die vulkanischen Erscheinungen am Vesuv und in den phlegräischen Feldern. Schon 1819 kehrte er wieder nach Italien zurück und besuchte diesmal auch die vulkanischen Gegenden der Campagna, die Liparischen Inseln und den Aetna. 1821 heiratete er die Erbin des alten Geschlechts Scrope und nahm ihren Namen an. In demselben Jahre bereiste er die Auvergne und war im folgenden zufällig Augenzeuge der großen Eruption des Vesuvs im Oktober 1822. Nach dem Besuch der Ponza-Inseln und der Euganeen kehrte er durch die Eifel nach England zurück. 1824 wurde er Mitglied der Geological Society of London, 1825 mit Ch. Lyell Sekretär dieser Gesellschaft; 1867 wurde ihm die Wollaston-Medaille verliehen. Seit 1833 war er Parlamentsmitglied und widmete sich von da an in erster Linie der Politik.

Scropes Verdienste für die Geologie und Gesteinskunde beruhen nicht nur in der siegreichen Vertretung vulkanistischer Anschauungen gegen den Neptunismus G. A. Werners, sondern vor allem in der vorzüglichen Erklärung der Entstehung und Zusammensetzung der Vulkane, in der Widerlegung L. v. Buchs Theorie von den Erhebungskratern und in der Annahme von unterirdischem Gesteinsmagma, das durch die Expansivkraft von Dämpfen an die Oberfläche gelangt. Seinen geologischen Beschreibungen der von ihm besuchten Vulkangegenden liegen außerordentlich exakte Beobachtungen zugrunde. Es seien hier nur genannt: „Considerations on Volcanos" (London 1825; 2. Ausgabe 1862; ins Deutsche übersetzt von Klöden, Berlin 1872). „On the Geology and extinct Volcanos of Central France etc." (London 1827, 2. Ausgabe 1858).

Literatur. *Quaterly Journal of Geol. Soc. of L., XXXII, Proceedings p. 69.* — *Geol. Magazine 1870, 193; 1876, 96.* — *Dictionary of National Biography (S. Lee), 1897, LI, 135.*

K. Spangenberg.

Sedgwick

Adam.

Als Sohn eines Geistlichen am 22. März 1785 zu Dent in Yorkshire geboren, studierte er in Cambridge Theologie und lag daneben mathematischen Studien ob. 1808 wurde er Hilfslehrer am Trinity College; 1818 erwählte man ihn zum Professor für Geologie an der Universität Cambridge. Seine Haupttätigkeit widmete er nun der geologischen Forschung. In Cumberland begann er seine Untersuchungen 1822. Mit Murchison, seinem unzertrennlichen Arbeitsgenossen während vieler Jahre, reiste er 1826 nach Schottland, untersuchte von 1830 an gemeinsam mit ihm Wales, Cumberland und die angrenzenden Gebiete. 1831 wurde er Präsident der Geological Society, der er seit 1818 als Mitglied angehörte, 1830 Mitglied der Royal Society.

Er gründete in Cambridge ein geologisches Museum, das durch seine eifrige Sammeltätigkeit bald sehr reichhaltig und berühmt wurde. Seine Verdienste wurden durch Verleihung der Wollaston-Medaille 1851 und der Copley-Medaille 1863 anerkannt. Er starb am 27. Januar 1873 in Cambridge.

Sedgwick war ein vorzüglicher Lehrer; seine geistreichen, oft mit Humor gewürzten Vorlesungen gaben viel Anregung. Seine Forschungen erstrecken sich hauptsächlich auf die paläozoischen Formationen Englands, Belgiens und Deutschlands, die er in Wales in Ermangelung von Versteinerungen fast ausschließlich nach lithologischen Merkmalen und Lagerungsverhältnissen gliederte. Seine Arbeiten führte er gemeinschaftlich mit R. Murchison aus, bis der Streit über das Cambrium die beiden Forscher und Freunde entzweite. So veröffentlichte er mit Murchison 1830 bis 1839 eine Monographie über Wales, Cumberland und die angrenzenden Grafschaften. Ebenso erschien von beiden: On the distribution and classification of the Older or Palaeozoic Deposits of the North of Germany and Belgium (Transactions Geol. Soc. 1842 vol. VI).

Als Murchison in sein „Silurian System" die von Sedgwick aufgestellte cambrische Formation einzugliedern versuchte, entbrannte der Streit zwischen den beiden Forschern, der zu einer erbitterten Feindschaft führte. Zu seiner Rechtfertigung veröffentlichte Sedgwick zusammen mit dem Paläontologen Fr. M. Coy: A synopsis of the Classification of the British Palaeozoic Rocks with a systematic description of the British Palaeozoic fossils in the Geological Museum of the University of Cambridge (London und Cambridge 1851 bis 1855). Er tritt darin für die Selbständigkeit des kambrischen Systems ein, und obwohl damals seine Fachgenossen infolge des Einflusses, den Murchison auf sie ausübte, seine Ansicht verurteilten, so hat ihm doch die Entwickelung der Geologie recht gegeben, die heute das Cambrium in vollem Umfange als selbständiges geologisches System ansieht.

Literatur. *J. W. Clark and T. Mc. K. Hughes, Life and Letters of the Reverend Adam Sedgwick, Cambridge 1890. — Dictionary of National Biography, Vol. LI, S. 179 bis 182.*

O. Marschall.

Sedimente.

Vgl. den Artikel „Gesteinsbildung".

Seebeck

Thomas Johann.

Geboren am 9. April 1770 in Reval, gestorben am 10. Dezember 1831 in Berlin. Er studierte Medizin, lebte später als Privatmann in Jena, Bayreuth, Nürnberg. 1818 wurde er zum Mitglied der Berliner Akademie der Wissenschaften ernannt. Seebeck wurde 1821 in Verfolgung der Oerstedtschen elektromagnetischen Versuche zur Entdeckung der Thermoelektrizität geführt. Weitere Arbeiten beschäftigen sich mit magnetischer Polarisation durch Temperaturdifferenzen. 1810 entdeckte er die photochemische Entstehung von Farben durch farbige Beleuchtung, es war dieses der erste Anfang der Farbenphotographie.

E. Drude.

Seen.

Süßwasserseen.

1. Entstehung. Seen sind nach Forel allseitig geschlossene, in einer Vertiefung des Bodens befindliche, mit dem Meer nicht in direkter Kommunikation stehende, stagnierende Wassermassen. Die zu ihrer Entstehung also notwendigen Vertiefungen des Bodens, Becken oder Wannen, können auf sehr verschiedene Weise hervorgebracht werden.

Einmal kann das Becken in den Boden eingesenkt sein (Eintiefungsbecken) oder es kann durch Aufschüttung eines Dammes oder Walles aus fremdem Material gebildet werden (Aufschüttungsbecken). Hierbei unterscheidet Supan eine einseitige Aufschüttung durch einen Damm (Dammbecken) oder eine allseitige, durch ungleichmäßige Anhäufung von Gesteinsmaterial (Wallbecken).

Ein solcher Damm, der einen Wasserlauf aufstaut, kann entstehen durch einen Gletscher, der sich vor ein Nebental legt (Märjelen See am Aletschgletscher). Es liegt in der Natur des Hindernisses, daß diese Eisseen meistens nur vorübergehende — zum Teil allerdings sich wiederholende — Erscheinungen sind (See der Rofener Ache durch den Vorstoß des Vernagtferners um 1600, 1680, 1770 und 1845).

Schuttmassen bilden als Bergstürze von den Talgehängen, als Schuttkegel, die von Seitenbächen oder Nebenflüssen abgelagert werden, und als End- oder Ufermoränen von Gletschern wirksame Dämme, hinter denen sich Bergsturzseen (Dorfer See im Dorfer Tal in den Tauern), Schuttkegelseen (Seen bei Reschen im oberen Vintschgau) und Moränendammseen aufstauen.

Vermag ein Hauptfluß sein Bett und seine

Ufer mehr zu erhöhen als seine Zuflüsse, so werden diese dadurch seenartig erweitert (Seen bei Galatz, nördlich der Donau). Aus den abgeschnürten Teilen vormaliger Stromläufe entstehen im Unterlauf und besonders häufig im Deltagebiet großer Ströme Stromlagunen (Seen am Unterlauf des Mississippi). Durch den Rückstau des Wassers der Nebenflüsse durch den Hauptfluß zur Zeit des Hochwasserstandes bilden sich im Flachland die Hochflutseen (Tung-ting-See am Jang-tse-kiang).

An der Küste können durch Vorwachsen eines Deltas (Akis-See an der Westküste von Kleinasien durch das Delta des Böjük-Menderes), oder durch Strandwälle Meeresbuchten abgeschnürt und Strandseen hervorgerufen werden (Deutsche Ostseeküste, Ostküste der Vereinigten Staaten), die zum Teil, wenn sie mit dem Meer noch in engerer Verbindung stehen, eine Uebergangsform zu den Lagunen darstellen.

Wird durch einen Lavastrom ein Tal abgedämmt, so bildet sich oberhalb ein Lavastromsee (Lac d'Aydat bei Clermont).

Wallseen treten dort auf, wo sich Schuttablagerungen mehr flächenhaft und mit unruhiger Oberfläche ausbreiten, so als Moränenwallseen im Gebiet der End- und vor allem der Grundmoränenlandschaften (zahlreiche Seen des norddeutschen Flachlandes und im Norden der Vereinigten Staaten); als Dünenseen in den Vertiefungen zwischen Dünen (in den Grandes Landes von Frankreich und am Unterlauf des Tarim in Zentralasien); und als Kraterseen bei erloschenen oder ruhenden Vulkanen.

Als Wallseen dürften auch die durch die aufbauende Tätigkeit von Korallen hervorgerufenen Atollseen anzusehen sein.

Die Eintiefungsbecken gliedern sich ohne weiteres in solche, bei denen die Eintiefung durch eine Ausräumung von Kräften, die von außen wirken, bedingt ist, und in solche, bei denen sie durch unterirdische Kräfte hervorgerufen wird.

Durch Ausräumung von lockerem Material durch den Wind entstehen Becken, in denen sich unter günstigen klimatischen Bedingungen Wasser zu Seen ansammeln kann. Durch fließendes Wasser werden einzelne abgeschlossene Becken nur unter besonderen Umständen gebildet werden können, wie etwa durch herabstürzende Gletscherschmelzwässer (Ausstrudelungsseen von E. Geinitz). Am häufigsten dagegen sind glaziale Ausräumungsbecken, die auf der erodierenden Tätigkeit der Gletscher beruhen und nach deren Schwinden von Wasser angefüllt worden sind. Hierher gehören die kleineren, meist rundlichen oder elliptischen Karseen in den Karen der Hochgebirge oder früher vergletscherter Mittelgebirge (Arber-Seen im Böhmerwald).

In den Tälern, die von Gletschern durchflossen worden sind, boten die zu Becken ausgearbeiteten Stellen stärkerer Erosion Anlaß zur Bildung von glazialen Talseen, während in den Zungenbecken am Ende der Eisströme, die meistens noch durch eine Abdämmung von Endmoränen vergrößerten Randseen entstanden sind. Im allgemeinen sind für diese glazialen Tal- und Randseen längliche Formen und ungegliederte Uferlinien charakteristisch (Randseen der Alpen u. a. m.). In den Gebieten einer einstmaligen Inlandeisdecke treten die in Felsbecken eingelagerten, unregelmäßig verteilten Seen von der verschiedensten Größe am zahlreichsten auf (Finnland, Skandinavien, Kanada).

Unter den unterirdischen Kräften vermag der Vulkanismus auf zweierlei Art Becken zu bilden, abgesehen von der schon erwähnten durch Aufschüttung entstandenen, und zwar entweder durch eine Explosion (Maarseen der Eifel), oder durch Einbruch und Zurücksinken (Seen der Albaner Berge bei Rom, Bolsinischer See, Crater Lake in Oregon).

Einbrüche entstehen auch dann, wenn unterirdisch ein Komplex von leicht löslichen Gesteinen fortgeführt wird, und das darüber liegende Dach zusammenstürzt. Zu diesen Auslaugungsseen gehört ein Teil der Karstseen und kleinere Seen am Rande des Harzes und Thüringer Waldes, wie die Mansfelder Seen.

Eine letzte Gruppe endlich bilden die tektonischen Seen. Man unterscheidet je nach dem Ursprung Bruch- und Faltungsseen. Unter den ersteren überwiegen solche, die in Gräben liegen, wie die der syrisch-afrikanischen Bruchzone (Tiberias-See und Totes Meer; Seen vom Rudolf-See bis zum Njassa-See und vom Albert-See bis zum Tanganjika, mit Ausnahme wahrscheinlich des Victoria-Sees), oder der Baikal-See in Zentralasien. Seltener sind die Faltungsseen, die meist dadurch entstehen, daß in einer Synklinale eine Wanne gebildet wird (Seen von St. Point und Remorey bei Pontarlier).

Mit der Art der Entstehung der Seen hängt es eng zusammen, daß sich einmal bei einer großen Anzahl nicht nur eine, sondern mehrere Ursachen ihrer Bildung feststellen lassen, man kann dann mit Forel von Seen gemischten Ursprungs reden, dann aber auch, daß sie in gewissen Gegenden, die man Seengebiete oder Seenregionen nennt, gesellig auftreten. Neben gewissen Küstenstrichen mit zahlreichen Strandseen, einigen Kalkgebieten mit Karstseen, den Unterläufen von großen Strömen mit Flußlagunen, gehören vor allem die Gebiete ehemaliger Vergletscherung hierher mit ihrem Reichtum an allen Arten von glazialen Seen,

die sich im allgemeinen zonenweise anordnen (Nordeuropa, Alpen, nördliches Nordamerika, südliches Südamerika).

2. **Das Seebecken.** Wenn unter günstigen klimatischen Bedingungen eine Wanne durch Wasser zu einem See aufgefüllt worden ist, wird ihr Relief durch die Tätigkeit dieser Wassermenge alsbald zum eigentlichen Seebecken umgestaltet. Jedes Seebecken zerfällt in die mehr oder weniger horizontale, meist ziemlich ebene Sohle und die mit mehr oder weniger steilem Neigungswinkel ansteigenden, sie allseitig umgebenden Gehänge. Die umgestaltenden Kräfte sind vor allem tätig in der Uebergangszone vom Wasser zum festen Land, in der Küstenregion, an die sich nach unten, die Sohle und die unteren Teile der Gehänge umfassend, die Tiefenregion anschließt. Die Küstenregion wieder gliedert sich in das Ufer, das heißt den den See umgebenden, von der Wellentätigkeit noch beeinflußten, Landgürtel, und in das Litoral, den entsprechenden Wassergürtel, der bis zur untersten Grenze der Wellentätigkeit reicht. Zwischen beide schaltet sich mit wechselnder Breite und auf beide übergreifend, der schwach geneigte Strand ein. Ein Teil von ihm, der trockene Strand, wird nur von den Ausläufern großer Wellen erreicht, in der eigentlichen Brandungszone unter dem Niedrigwasserstand liegt der überschwemmte Strand, dessen Rolle bei Hochwasserstand auf den überschwemmbaren Strand übergeht. Genau wie an den Meeresküsten wirkt in der Küstenregion eines Sees die chemische und mechanische Erosion des Wassers, von denen die auf der Stoßkraft der Brandungswelle beruhende mechanische die morphologisch ausschlaggebende ist. Das Ufer wird untergraben, die oberen Partien verlieren den Halt, stürzen ab und bilden eine Schutthalde, die nun von den Wellen aufgearbeitet wird, worauf von neuem das Unterwaschen einsetzen kann. Es bildet sich dadurch ein langsam zurückweichender, je nach der Gesteinsbeschaffenheit mehr oder weniger steiler Abfall, das Kliff, vor dem sich an der Stelle des zerstörten Ufers eine flach abfallende, in das anstehende Gestein eingearbeitete Brandungsterrasse, die ausgewaschene Uferbank ausbreitet. Das durch diese Arbeit gelieferte Material, Geröll, Sand und Schlamm, wird zum Teil an der unteren Grenze der Wirksamkeit der Wellen, wohin es der Unterstrom oder Sog führt, abgesetzt und bildet hier den zweiten Teil der Uferbank, die angeschwemmte Uferbank (Fig. 2 c), deren Abfall gegen die Tiefe des Sees hin Seehalde genannt wird. Ein anderer Teil dieses Zerstörungsmaterials wird, wie an den Meeresküsten, zum Aufbau von Strandwällen benutzt, die auch in der Form von Haken auftreten und dadurch Buchten abschließen können (Südküste des Lake Ontario). Die feinsten Teile endlich werden als Seeschlamm von Strömungen verfrachtet und überall im Seebecken abgesetzt (Fig. 2 a). Mit diesen Ablagerungen vereinigen sich die, die durch Zuflüsse in den See hereingebracht werden. Sie bilden in der Hauptsache an der Mün-

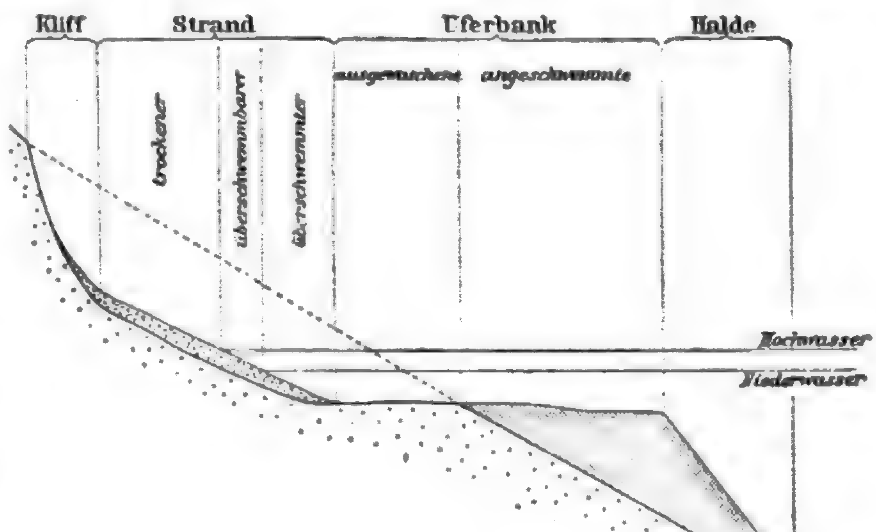


Fig. 1. Schema der Erosionsküste eines Sees. Aus Forel, Handbuch der Seenkunde.

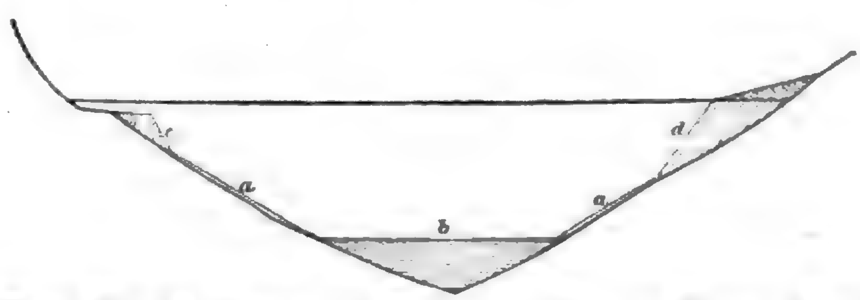


Fig. 2. Die vier Ablagerungstypen in einem See. Aus Forel, Handbuch der Seenkunde.

dungsstelle Schuttkegel, die Deltas (Fig 2 d). Die feineren Flußalluvionen dagegen vermischen sich mit dem eben erwähnten Seeschlamm und dienen vor allem zur Ausgleichung der Unebenheiten der Sohle des Seebeckens (Fig. 2 b). Auf ihr verhindern im allgemeinen nur Quellen eine Ablagerung (Trichter „Boubioz" im Lac d'Annecy), so daß man die meist vorhandene große Einförmigkeit der Sohle mit als eine charakteristische Eigentümlichkeit der Seen bezeichnen kann. Diese zentrale Ebene, (Fig. 2 b), die von den steileren Schutthalden (Fig. 2 c und d), und den flacheren Schwemmhalden (Fig. 2 a), zu unterscheiden ist, wächst natürlich mit andauerndem Schlammabsatz und erreicht z. B. im Genfer See etwa 60 qkm mit einer gleichmäßigen Tiefe von 310 m.

3. Der Wasserhaushalt. Jeder See wird gespeist durch die Wasserzufuhr, die entweder durch einmündende Flüsse (F), oder durch Quellen im Seebecken (Q), oder durch direkt in den See fallenden Niederschlag (N) zusammengesetzt wird. Die Wassermenge erleidet Verluste durch die Verdunstung (V), außerdem unter Umständen durch Versickerung in den Boden (J) und durch einen Abfluß (A). Ein solcher Abfluß entsteht entweder durch ein Ueberfließen an irgend einer Stelle oder durch eine Anzapfung durch rückschreitende Erosion eines Wasserlaufes der Umrahmung. Man unterscheidet danach Seen mit Abfluß oder Flußseen und Seen ohne Abfluß, abflußlose Seen oder Endseen (vgl. den Artikel „Seen. Abflußlose Seen").

Wenn die Zufuhr gleich ist dem Verlust, wird der Seespiegel eine konstante Höhe und der See den gleichen Umfang haben. Durch irgend eine Veränderung eines Faktors dagegen werden Schwankungen eintreten. Diese Veränderungen werden in der Hauptsache bedingt durch klimatische Einflüsse im Lauf des Jahres (N, F, V), in geringem Maß durch die Topographie des Seebeckens und seiner Umgebung. Am geringsten werden die Schwankungen sein bei Niederschlag zu allen Jahreszeiten und gleichmäßiger Temperaturverteilung. In Gegenden mit einer Trockenzeit und hoher Temperatur entstehen starke Schwankungen (Fehlen von F und N, Ueberwiegen von V). Ein Beispiel dafür sind die Seen der Subtropen, besonders natürlich die der Wüstengebiete. Es kann das Sinken des Wasserspiegels soweit gehen, daß der Abfluß versiegt (Seen mit intermittierendem Abfluß im Gegensatz zu solchen mit konstantem Abfluß), oder daß endlich der See vollkommen verschwindet (temporäre Seen im Gegensatz zu permanenten). In der gemäßigten Zone sind die Schwankungen geringer durch das Fehlen einer Trockenzeit. Hier macht sich die Form des Niederschlages insofern geltend, als im Winter durch den Schneefall die Zufuhr verringert wird und ein Tiefstand eintritt, im Frühling der See mit der Schneeschmelze steigt, im Sommer mit wachsender Verdunstung fällt und im Herbst wieder steigt, wenn diese abnimmt. In polaren Gegenden wechselt nur ein Tiefstand im Winter mit einem Hochstand im Sommer ab.

Neben diesen jährlichen Schwankungen treten säkulare auf, die mit den bekannten Klimaschwankungen zusammenhängen.

4. Bewegungen des Seewassers. An der Oberfläche der Seen erzeugt der Wind genau so wie auf dem Meer fortschreitende Wellen, nur natürlich nach jeder Richtung hin von viel geringerem Ausmaß. Neben ihnen sind auf einer großen Anzahl von Seen stehende Wellen, sogenannte Seiches, beobachtet worden. Sie machen sich als eigentümliche Schaukelbewegungen des Wasserspiegels bemerkbar; während an einem Ufer das Wasser steigt, fällt es am entgegengesetzten, um dann an diesem zu steigen, und an jenem zu fallen. So geht das Spiel mit nach und nach geringer werdendem Ausschlag oft stundenlang fort. Nach den Untersuchungen von Forel hängt diese Erscheinung mit dem Eintreten von Luftdruckveränderungen zusammen; rasche Druckzunahme an einem Ufer bewirkt eine Erniedrigung des Seespiegels an dieser Stelle und zum Ausgleich ein Steigen an der entgegengesetzten. Die Bewegung in der Form von einknotigen, seltener zweiknotigen Wellen dauert dann so lange, bis das gestörte Gleichgewicht wieder hergestellt ist.

Strömungen werden von den vorherrschenden Winden nach Art der Meeresströmungen besonders auf großen Seen (Nordamerika) hervorgerufen; daneben erzeugen auch thermische und hydrostatische Ursachen Ausgleichsströmungen. Im Gegensatz zu denen des Meeres sind sie schwach und unregelmäßig. Endlich entsteht von der Einmündung der Zuflüsse eine Strömung nach dem Abfluß, die aber nur in einem kleinen, von einem großen Strom durchflossenen See bemerkbar wird.

5. Die Temperaturverteilung. Die hauptsächlichste Wärmequelle für das Wasser der Seen ist die direkte Wärmestrahlung durch die Sonne, die Insolation. Neben ihr spielen alle anderen Wärmequellen nur eine untergeordnete Rolle. Ebenso findet der Wärmeverlust vor allem durch die Ausstrahlung an der Oberfläche statt. Es sind also die oberen Schichten für die Temperaturverteilung maßgebend, von ihnen gehen die jährlichen und täglichen Schwankungen aus. Von der direkten Sonnenstrahlung wird dabei nur eine relativ dünne Oberflächenschicht beeinflußt, nach der Tiefe findet ein Wärmeaustausch durch das Absinken abgekühlter und deshalb dichterer und schwererer und durch das Aufsteigen wärmerer und deshalb leichterer Schichten

statt. Dabei ist es von der größten Bedeutung, daß das Süßwasser seine größte Dichte schon bei 4° C erreicht, kälteres Wasser ist also wieder leichter und kann nicht mehr absinken. Eine Wassersäule also mit einer Temperatur von über 4° C zeigt eine Temperaturabnahme von oben nach unten, also eine direkte Temperaturschichtung, eine unter 4° C aber eine verkehrte, die Temperatur nimmt hier von oben nach unten zu. Diese Schichtung verstärkt sich durch weitere Erwärmung oder Abkühlung, eine Abkühlung dagegen des warmen und eine Erwärmung des kalten Wassers führt zu einer Aufhebung der Schichtung. Die täglichen Schwankungen gehen bei den Seen unserer Breiten bis zu einer Tiefe von 5 bis 15 m; die jährlichen bis zu 100 und 150 m. Unterhalb dieser Grenze werden Schwankungen nach Forel dadurch hervorgerufen, daß die mit Sinkstoffen beladenen Wassermassen der Zuflüsse eine größere Dichte besitzen können als die in der Tiefe und infolgedessen auf den Grund sinken. Wenn diese Zuflüsse warm sind, kann durch sie auf diesem Weg eine Erwärmung der tieferen Schichten erfolgen (Genfer See, Tiefenwasser 4 bis 5° C, Rhonewasser im Sommer 10 bis 15° C).

Die normale Abnahme der Temperatur nach unten vollzieht sich im allgemeinen nicht gleichmäßig, sondern von der Grenze der Wirksamkeit der täglichen Schwankung ab erfolgt in der sogenannten Sprungschicht eine raschere Abnahme. Die tägliche Temperaturschwankung an der Oberfläche erzeugt während der Abkühlung in der Nacht eine vertikale Zirkulation, und durch die auf diese Weise eintretende Mischung wird eine Schicht mit gleichmäßiger Temperatur gebildet, von deren unterer Grenze an dann die normale Abnahme einsetzt, die natürlich gegen die größeren Tiefen hin allmählich ausklingt. Aus alledem ergeben sich gewisse Unterschiede in der Ausgestaltung der Wärmeverhältnisse, die besonders von der geographischen Lage und der Höhe eines Sees abhängen, die aber nach Halbfaß auch stark von der Gestalt des Seebeckens beeinflußt werden. Man kann warme, gemäßigte und kalte Seen unterscheiden. Diese Benennungen Supans sind denen von Forel, tropisch, gemäßigt und polar, die nur die Breitenlage berücksichtigen, vorzuziehen. In den warmen Seen hat die Oberfläche immer eine Temperatur von über 4° C, die Temperatur nimmt das ganze Jahr hindurch mit der Tiefe ab, es herrscht also eine regelmäßige Wärmeschichtung. Hierzu gehören die Seen der Tropen, aber auch eine Anzahl Seen der gemäßigten Zonen in geringer Meereshöhe, die eine große Ausdehnung und Tiefe, also eine bedeutende Wassermasse, und eine starke Mischung des Wassers zeigen (Genfer See). Die gemäßigten Seen haben im Sommer genau wie die warmen eine regelmäßige Temperaturschichtung. Mit der Abkühlung wird dann im Herbst ein Moment erreicht, in dem die ganze Wassersäule die Temperatur von 4° C hat. Nun können die sich weiter abkühlenden Schichten nicht mehr untersinken, und es tritt infolgedessen eine verkehrte Temperaturschichtung im Winter ein. Eine Eisbildung beginnt daher immer an der Oberfläche und nimmt langsam nach unten zu. Bei genügender Tiefe aber ist ein vollständiges Gefrieren unmöglich, was für die Erhaltung organischen Lebens in unseren Seen von besonderer Bedeutung ist. Im Frühjahr kommt mit allmählicher Erwärmung natürlich ebenso ein Moment des Ueberganges mit einer Temperatur von 4° C in der ganzen Wassersäule. Alle Seen in den Gebirgen der gemäßigten Zonen und die im Gebiet eines extrem kontinentalen Klimas gehören dieser Gruppe an.

In den kalten Seen endlich erreicht die Oberfläche niemals eine Temperatur über 4° C, es herrscht also das ganze Jahr hindurch eine verkehrte Temperaturschichtung. Die Seen in den höheren Regionen der Hochgebirge der gemäßigten Zonen und die der polaren bilden diese letzte Abteilung.

6. **Die Farbe der Seen.** Die Farbe der Seen hängt abgesehen von der blauen Eigenfarbe des Wassers von dem Grad der Beimengungen verschiedener gelöster Substanzen ab. Unter ihnen stehen an erster Stelle organische humöse Stoffe, durch deren wachsende Beimischung das Wasser grün, dann gelblich grün und endlich braun wird. Daneben sind von Einfluß gelöster Kalk und Eisensalze. Die Menge dieser gelösten Bestandteile ist abhängig von den geologischen Verhältnissen. So werden braune Seen häufig sein in Gegenden mit Mooren oder mit zahlreichen Verwesungs- und Verwitterungsprodukten (Granit, Gneis), grüne in humusärmeren Gebieten (Kalkstein). Seen endlich, die nur von Quellen oder von wenigen, kleinen Zuflüssen gespeist werden, sind blau (Crater Lake in Oregon).

7. **Die Chemie des Seewassers.** Die chemische Zusammensetzung des Seewassers wird bestimmt durch die des zugeführten Wassers (Regen, Quellen und Flüsse, Näheres siehe unter diesen Artikeln). Während des Verweilens im Seebecken können Veränderungen durch chemische Niederschläge oder Auflösung von Gesteinen und eine Verdünnung durch Regen herbeigeführt werden. Von ausschlaggebender Bedeutung ist aber die Art der Wasserabfuhr. Die Verdunstung bewirkt eine Anreicherung an Salzen, ober- oder unterirdische Abflüsse dagegen verhindern eine weitgehende Veränderung des Wassers. Endseen enthalten infolgedessen salziges, Flußseen aber süßes Wasser.

8. **Das Verschwinden von Seen und ihre Altersstufen.** Seen sind im allgemeinen

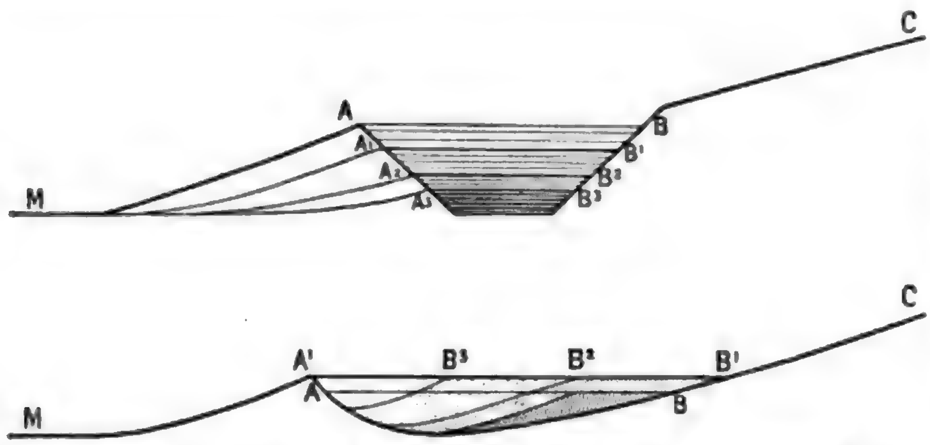


Fig. 3. Schema des Verschwindens von Seen. Oben Verschwinden durch Erosion: M Erosionsbasis im Meeresniveau, MA, MA_1, MA_2, MA_3, Profil des Abflusses, der sein Bett nach und nach vertieft; AB, A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 allmählich sinkender Seespiegel. Unten, Verschwinden durch Auffüllung: AB, ursprünglicher Seespiegel, BC einmündender Fluß, A_1B_1 Seespiegel durch die Auffüllung gehoben, A_1M dadurch entstehender Abfluß, CB_1, CB_2, CB_3 Zufluß, der nach und nach den See zuschüttet, A_1B_1, A_1B_2, A_1B_3 allmählich zurückweichender Seespiegel. Aus Martonne, Traité de géographie physique.

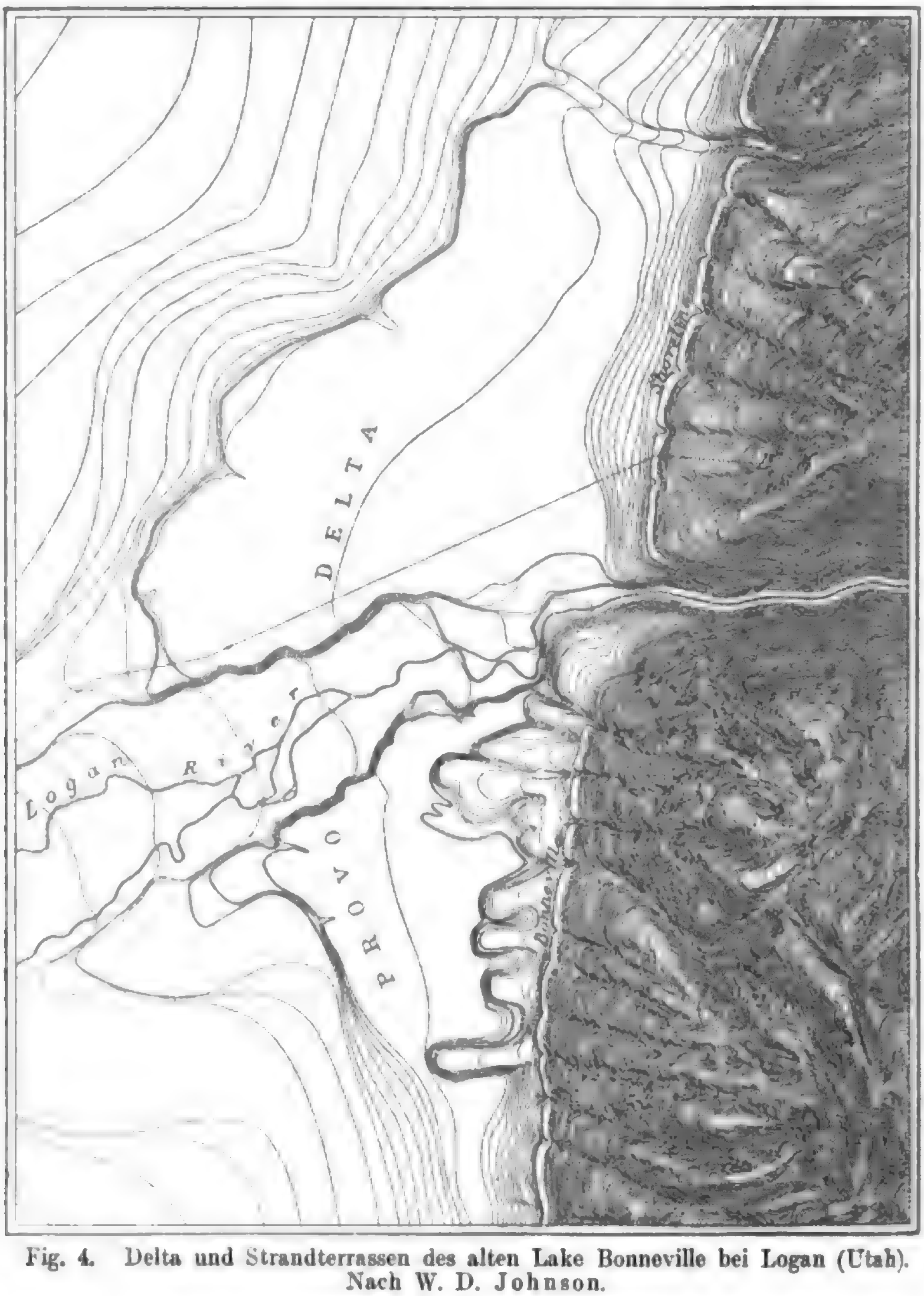


Fig. 4. Delta und Strandterrassen des alten Lake Bonneville bei Logan (Utah). Nach W. D. Johnson.

vergängliche Erscheinungen. Ihr Erlöschen kann einmal bedingt sein durch eine Aenderung der klimatischen Verhältnisse, unter denen sie entstanden sind. Wird das Klima trockener, so wird dadurch die Wasserzufuhr abnehmen, die Verdunstung dagegen gesteigert. Dies führt zu einer Verringerung des Umfanges und der Tiefe und endlich, wenn auch oft durch Schwankungen unterbrochen, zu einem vollständigen Verschwinden. Dieser Fall ist seit der Eiszeit an vielen Stellen eingetreten, so sind von den beiden großen Seen im Gebiet der Basin Ranges von Nordamerika, dem Lake Lahontan und Lake Bonneville nur noch spärliche Reste vorhanden. Bei gleichbleibenden klimatischen Bedingungen sind zwei Möglichkeiten des Erlöschens gegeben. Bei Flußseen wird unter Umständen der Abfluß sein Bett mehr und mehr vertiefen, dadurch wächst die Menge des abfließenden Wassers, und es muß eine allmähliche Entleerung eintreten, die erst aufhören kann, wenn der Wasserspiegel unter dem Meeresniveau liegt (Fig. 3 oben). Durch Ablagerungen aber von einmündenden Zuflüssen werden Seen nach und nach zugeschüttet. Ist unter solchen Verhältnissen kein Abfluß vorhanden, so wird natürlich zuerst der Wasserspiegel gehoben, bis ein Ueberlaufen an irgendeiner Stelle der Umrahmung erfolgt (Fig. 3 unten). Die Zuschüttung kann an einem Ende ansetzen, dann werden sich hier alluviale Talebenen anschließen (am Genfer See vom heutigen oberen Ende bis nach Bex), oder es kann eine Zerlegung eines Sees durch ein Delta, das von der Seite aus vorgebaut wird, den Anfang machen (das von der Lütschine aufgebaute Bödeli zwischen Brienzer und Thuner See).

Es lassen sich bei Seen ebenso wie bei den anderen Oberflächenformen Altersstufen im Sinne von Davis feststellen, wie es auch Forel getan hat. Im Jugendalter sind die geschilderten Formen der Seenablagerungen noch kaum vorhanden, das Relief der ursprünglichen Wanne ist noch ziemlich unverändert, ein Abfluß wird vielfach noch fehlen. Im Reifestadium sind eine Uferbank und eine zentrale Ebene ausgebildet, die einmündenden Flüsse fangen an Deltas vorzubauen, ein Abfluß wird erreicht sein und der Wasserhaushalt ist den klimatischen Verhältnissen angepaßt und geregelt. Im Greisenalter nehmen die Ablagerungen mehr und mehr zu, alluviale Ebenen umgeben den See, die Tiefe wird immer geringer, die Schwankungen der Oberfläche wachsen dadurch. So geht der See nach und nach in einen Weiher, der in seiner ganzen Ausdehnung von einer litoralen Seeflora eingenommen wird, und endlich in einen Sumpf über. Zurückgehende oder erloschene Seen lassen abgesehen von ihren Ablagerungen morphologische Spuren ihrer einstigen Ausdehnung zurück. Der alte Seeboden bildet eine Ebene unter Umständen mit Salzkrusten oder mit kleinen Wasseransammlungen, sumpfigen Stellen und sauren Wiesen. Alte Uferlinien sind an Strandterrassen oder Strandwällen, die oft in größerer Anzahl übereinander an den Gehängen auftreten, die Einmündung von Zuflüssen an Deltabildungen zu erkennen. Prachtvoll sind z. B. solche Spuren von den beiden großen Seen im Gebiet der Basin Ranges in Nordamerika, dem Lake Bonneville und Lake Lahontan erhalten (Fig. 4).

Literatur. ***O. Frhr. von und zu Aufsess,*** *Die physikalischen Eigenschaften der Seen. (Die Wissenschaft, Heft 4.) Braunschweig 1905.* — ***F. A. Forel,*** *Handbuch der Seenkunde. Allgemeine Limnologie. Stuttgart 1901.* — ***W. M. Davis,*** *Die erklärende Beschreibung der Landformen. Deutsch bearbeitet von A. Rühl. Leipzig u. Berlin 1912.* — ***E. de Martonne,*** *Traité de Géographie physique. Paris 1909.* — ***A. Penck,*** *Morphologie der Erdoberfläche. 2 Bde. Stuttgart 1894.* — ***F. Frhr. von Richthofen,*** *Führer für Forschungsreisende. Hannover 1886.* — ***A. Supan,*** *Grundzüge der physischen Erdkunde. 5. Aufl. Leipzig 1904.* — ***H. Wagner,*** *Lehrbuch der Geographie. 1. Bd., 9. Aufl. Hannover u. Leipzig 1912.*

G. W. v. Zahn.

Seen.

Abflußlose Seen.

1. Einleitung. 2. Morphologie der abflußlosen Becken: a) Endogen entstandene Becken. b) Exogen entstandene Becken. 3. Besonderheiten der abflußlosen Seebecken. 4. Wasserverhältnisse: a) Herkunft des Wassers. b) Schwankungen des Wasserstandes. c) Salzgehalt. d) Temperaturverhältnisse. e) Wellenbewegung. 5. Sedimente: a) Beschaffenheit. b) Bewegungserscheinungen. 6. Geschichtliche Entwickelung abflußloser Seen: a) Ausfüllung. b) Anzapfung. c) Klimaänderung. d) Verschüttung und Verlegung in Trockengebieten. 7. Geographische Verbreitung: a) An Flachküsten. b) In Glazialgebieten. c) In Vulkangebieten. d) An Flüssen. e) In ausgetrockneten Alluvialgebieten. f) In abflußlosen Gebirgen. g) Reliktenseen.

1. **Einleitung.** Die Darstellung und Klassifikation der abflußlosen Seen stößt auf einige Schwierigkeiten, weil es nicht möglich ist, sie unter einem einheitlichen Gesichtspunkt zu betrachten. Es sind nämlich so verschiedenartige Formen vorhanden, so verschiedene Kräfte tätig gewesen, daß es unmöglich ist, alle diese verschiedenen Merkmale kurz zusammenzufassen und zu einem einheitlichen System zu vereinigen. Vielmehr muß man den Stoff nach mehreren Gesichtspunkten ordnen. Hinsichtlich der hier gewählten Einteilung sei auf die Disposition verwiesen. Bemerkt sei hier nur, daß unter abflußlosen Becken die ganze abflußlose Hohlform verstanden sei, der von dem Wasser einge-

nommene Teil des Beckens aber mit Forel hier Seebecken genannt sei.

2. Morphologie der abflußlosen Becken. Nach den wirksam gewesenen Kräften hat man endogen und exogen entstandene Becken zu unterscheiden.

2a) Endogen entstandene Becken. Tektonische abflußlose Becken. Daß in Faltengebirgen infolge des Faltungsprozesses abgeschlossene Becken entstehen können, wird man für den Fall annehmen können, daß ein Gebirge durch Aufwölbung der Oberfläche entsteht. Allein wir wissen ja gar nicht, wie die Oberfläche eines sich bildenden Faltengebirges aussieht, ob die Faltung in der Tiefe vor sich geht oder ob sich die Ketten aufwölben und übereinanderschieben. Während also die Entstehung abgeschlossener Becken durch reinen Faltungsprozeß unsicher ist, wird man Beckenbildung durch Verwerfungen unbedingt als sicher annehmen können. Die zum Teil mit Seen erfüllten Hochländer Ostafrikas, die Seebecken des Kolumbia-Basaltplateaus in den Vereinigten Staaten, das lokal in Schollen zerbrochen ist, die Becken des Lahontan- und Bonnevillesees sind Beispiele hierfür. Auch die großen Beckensenken der Kontinente, die tektonischen Bewegungen — Abbrüchen, Flexuren — ihr Dasein verdanken dürften und oft genug mit abflußlosen Seen erfüllt sind, wären hier zu nennen. Afrika, Australien, Asien bieten zahlreiche Beispiele hierfür.

Durch vulkanische Kräfte entstandene abflußlose Becken. In vulkanischen Gebieten sind abflußlose Seen, die oft genug die landschaftliche Schönheit bedingen, keine Seltenheit. Man denke an die Eifel, das Albaner Gebirge, an Toskana. Ihrer Entstehung nach lassen sie sich in zwei Abteilungen zerlegen. Die erste umfaßt die durch Explosion entstandenen Seebecken, also die Maare, die in das Grundgestein eingesprengt sind und die Kraterseen auf dem Gipfel explosiv aufgeschütteter Vulkane.

Die zweite Abteilung umfaßt die durch Abdämmung infolge Aufschüttung vulkanischer Eruptionsprodukte entstandenen Becken abflußloser Seen. Wenn ein Lavastrom quer über ein Tal fließt und es verstopft, wenn ein Vulkangebirge den Gewässern einer Senke den Weg verlegt oder einen Meerbusen abtrennt, so entstehen abflußlose Seebecken. Freilich haben solche Seen in feuchtem Klima gewöhnlich nur kurzen Bestand, weil sie überlaufen oder von außen angezapft werden. Als Beispiele hierfür könnte man anführen den Kiwusee in Zentralafrika und den Nikaraguasee, die jetzt aber nicht mehr abflußlos sind.

Erdbeben als Aeußerungen von Kräften, die im Erdinnern walten — auf die Ursachen haben wir hier nicht einzugehen — schaffen mitunter in großer Zahl abflußlose Seen. Diese kommen durch lokale Einbrüche zustande, die sich mit Grundwasser erfüllen. Als Beispiel sei das ostindische Beben vom 12. Juni 1897 erwähnt, bei dem östlich des Bramaputra zahlreiche Seen entstanden. Obwohl nur ein Teil des erschütterten Gebietes bereist wurde, sind doch 30 Erdbebenseen gezählt worden. Bei dem Beben am Mississippi 1811 bis 1813 entstanden durch Senkung des Bodens zahlreiche Seen, darunter der etwa 38 km lange und mehrere Meter tiefe Reelfortsee. Bei dem Beben in Kalabrien im Jahre 1783 entstanden 215 Seen. Im allgemeinen haben solche Seen keine lange Lebensdauer. Sie werden bald angezapft oder ausgefüllt (30a)[1].

Hebungen und Senkungen, also die langsamen, sogenannten säkularen oder epirogenetischen Bewegungen der Kruste spielen, wie im allgemeinen in der Geschichte der Erde so auch bei der Entstehung abflußloser Becken, eine große Rolle. Senkungen führen zur Bildung abflußloser Seen, wenn sie innerhalb eines Kontinents eintreten und solchen Umfang annehmen, daß die Gewässer in die entstehende zentrale Depression geleitet werden. Ob solche Senkungen ohne Verwerfungen eintreten können, ist freilich eine andere Frage. Solche, lediglich durch langsame Einsenkung entstandene Becken sind mehr hypothetische als tatsächlich nachgewiesene Gebilde.

Dagegen spielen Hebungen eine große Rolle. Wenn durch Einbruch entstandene, durch Schwellen von dem offenen Ozean getrennte Becken, wie sie häufig den Rand der Kontinente begleiten — z. B. Ochotskisches Meer, Japanisches Meer, Rotes Meer, das ganze europäische Mittelmeer und seine Nebenmeere u. a. m. — gehoben werden, dann entstehen abgeschlossene Becken, die namentlich in trockenem Klima abflußlos bleiben. Das nächstliegendste Beispiel für solches abgeschnürte Meer ist das arolo-kaspische Becken mit den Reliktenseen des Ural- und Kaspisees. Abflußlos waren früher einmal Ostsee und Schwarzes Meer und weisen die geologischen Formationen in manchen Gegenden auf einen beständigen Wechsel von Meeren mit und ohne Zusammenhang mit dem Ozean hin (z. B. Tertiäres Mittelmeer in Ost- und Zentraleuropa).

R. Credner hat in seiner zusammenfassenden Arbeit über die Reliktenseen alle jene Seen zusammengestellt, die marine Tierarten enthalten, allein es ist doch sehr zweifelhaft, ob alle Seen mit Tieren von marinem Charakter wirklich einmal mit dem Meer in Zusammenhang gestanden

[1]) Solche in Klammern beigefügten Zahlen verweisen auf die entsprechende Nummer der am Schluß des Artikels aufgeführten Literatur.

haben, wie z. B. Koppensee im Riesengebirge, Tanganikasee, Titikakasee, Baikalsee. Denn Konvergenzerscheinungen durch Anpassung an das Salzwasser oder an die großen Tiefen können sehr wohl eintreten. Besaß doch die Fauna der Hamburger Wasserleitung nach Kraepelins Untersuchungen wegen des hohen Druckes und des Lichtmangels Tiefseecharakter. Die Anpassung muß also fabelhaft schnell erfolgt sein. Wie dem auch sei, Credners Arbeit orientiert am schnellsten über die in Frage kommenden Gebiete, unter denen sich auch viele abflußlose befinden und sei auf diese hier verwiesen.

2b) Exogen entstandene Becken. Fließendes Wasser kommt bei der Entstehung abflußloser Becken kaum in Betracht. Eher kommt das bei stehendem Wasser vor, nämlich in löslichen Gesteinen. So glaubt man, daß manche abflußlose Hohlformen, die sich periodisch mit Wasser füllen, durch Auflösung des Kalkes entstanden seien. Hierher gehören die Dayas, jene flachen schalenförmigen Vertiefungen, die dichtgedrängt in einer bestimmten Zone südlich des Saharaatlas liegen. Französische Forscher halten sie für Produkte der Auflösung durch stehendes Wasser. Allein abgesehen davon, daß das Gestein, in dem sie sich finden, Sandstein ist, könnten bei ihrer Entstehung auch andere Kräfte mitgewirkt haben. In der Regenzeit bilden sie jedenfalls periodische Teiche.

An dieser Stelle sind wohl am passendsten die Hohlformen zu erwähnen, die — z. B. in Island — dadurch entstehen, daß beim Abschmelzen von Inlandeis einzelne Eisklötze im Schutt stecken bleiben und allmählich abschmelzend ein Loch verursachen. Die Sölle Norddeutschlands, die in so großer Zahl streckenweise in der Grundmoränenlandschaft verbreitet sind und jetzt abflußlose Teiche und Sümpfe bilden, dürften zum Teil in der oben geschilderten Weise entstanden sein.

Wichtiger als das fließende oder stehende Wasser ist für die Ausgestaltung von abflußlosen Becken das Eis. Es ist ja bekanntlich eine der umstrittensten Frage, ob die Gletschererosion imstande ist, größere Becken auszuschleifen oder nicht. Wir müssen es uns versagen, hier darauf einzugehen. Jedenfalls besitzen alle einstmals vergletschert gewesenen Gebirge solche Felsbecken, die z. T. abflußlos sind (Alpen, Tatra u. a. m.). Auch ist es sicher, daß neben der Aushöhlung auch die Aufschüttung bei der Beckenbildung gewöhnlich eine nicht unerhebliche Rolle spielt.

Periodisch in die eigenen Ablagerungen vorstoßende Inlandeismassen dürften erhebliche Erosionswirkung ausüben und die tiefen Rinnen, die die End- und Grundmoränenlandschaften der Diluvialzeit auszeichnen, geschaffen haben. Zum Teil sind solche Rinnenseen noch heutzutage abflußlos und in noch höherem Maße gilt das für die zahllosen kleinen Kessel derselben Gebiete, die vielleicht dem in Spalten herabstürzenden Schmelzwasser unter dem Inlandeis ihre Entstehung verdanken.

Noch bedeutsamer als das Gletschereis ist die Winderosion für die Schaffung abgeschlossener Kessel, die oft genug mit periodischen Seen erfüllt sind. Daß kleinere Pfannen, die einige hundert Meter im Durchmesser besitzen, von dem Wind ausgeräumt werden können, ist zweifellos, ob auch große Becken, wie z. B. die 30 bis 100 und mehr Kilometer langen und breiten und 2 bis 3 m tiefen Becken der Oasen der libyschen Wüste, ist noch eine offene Frage. Manche Forscher neigen zu der Annahme tektonischer Entstehung, andere bestreiten entschieden den Einfluß von Verwerfungen. Wird der Wind in Salzsteppen durch wühlende und tretende Tierscharen unterstützt, wenn also zoogene Winderosion stattfindet, so kann der Wind kleinere Becken und Pfannen schaffen, in denen in der Regenzeit periodische Teiche entsteher. An solchen Plätzen sammelt sich das Wild namentlich am Ende der Trockenzeit an und gerade diese Zeit ist für die Vergrößerung und Vertiefung der Pfannen und Teiche am bedeutsamsten. Wo dagegen Quellen irgendwelcher Art den durstigen Tieren in den wasserarmen Steppen auch während der Trockenzeit einen Stützpunkt gewähren, können tiefe Teiche in kessel- oder pfannenförmigen Hohlformen entstehen, und zwar allein durch zoogene Erosion, indem die Tiere durch Trinken und durch Wälzen beim Baden den Schlamm hinaustransportieren. Solche durch zoogene Erosion entstandene Teiche sind z. B. manche Kalk- und Sandpfannen der Kalahari, während an der Ausgestaltung anderer auch der Wind neben den Tieren tätig gewesen ist.

Durch Aufschüttung entstandene abflußlose Becken. Fließendes Wasser neigt zur Bildung von abflußlosen Seen in höherem Maße durch Aufschüttung als durch Erosion. Hierher gehören einmal die Überschwemmungsseen der Flüsse. Wenn mit Schutt beladene Flüsse aus einem Gebirge in eine Ebene heraustreten oder durch Hochwasser periodisch geschwellt werden, so treten sie aus und setzen das mitgeschleppte Material ab. So entstehen bekanntlich oftmals Deiche, die von den Flüssen selbst aufgebaut werden, und begleitet werden diese von Seen und Teichen, die tiefer als das Flußbett liegen und daher abflußlos sind. Sie werden entweder regelmäßig während des

Hochwassers gefüllt oder nur ausnahmsweise. Wenn Nebenflüsse des Hauptflusses durch den Sedimentwall des Hauptflusses abgesperrt werden, dann verursachen sie oft die Bildung von dauernden oder periodischen Seen. Im Potiefland sind solche Flußseen nur im Delta erhalten geblieben wegen des Einflusses der Kultur, im ungarischen und wallachischen Donautiefland, an den Steppenflüssen Südrußlands, Asiens und des Mississippigebietes sind sie dagegen in großer Zahl und von typischen Formen entwickelt.

Außer in der Form des Flußwassers schafft das fließende Wasser auch in Steppengebirgen abflußlose Becken in großer Zahl vermittels der Ueberschwemmungsregen und der an sie geknüpften Flächenspülung. Von den Bergen werden nämlich durch die Gewitterregen oder durch die Schmelzwasser des Winterschnees die durch Insolation entstandenen Schuttmassen herabgeschwemmt. Das gröbste Material wird am Fuß des Gebirges abgelagert, das feinste gelangt in die abflußlosen Ebenen, die die tiefsten Stellen jener einnehmen.

Da es in abflußlosen Gebieten nie an Salzen fehlt, entstehen Salztonflächen. Es sind das während der Trockenzeit kahle, mit Salzreif bedeckte, trockene oder feuchte Tonflächen, in der Regenzeit aber oftmals unpassierbare Salzsümpfe, Salzpfannen und Salzseen. Das sind die Sebchas Nordafrikas, die Takyre Transkaspiens, während die Salzsümpfe in letzterem Gebiet Schore heißen (40). Je nach der ursprünglichen Konfiguration der Berge und Ebenen, je nach der Vorgeschichte eines Landes entstehen mehr oder weniger zahlreich solche isolierte Becken von dieser oder jener Form. Als Beispiele kann man nennen die zentralasiatischen Hochländer, namentlich Tibet, Iran, die Hochsteppen Algeriens und Südafrika, die abflußlosen Hochplateaus des Felsengebirges und der Anden.

Abdämmung durch fließendes Wasser kann auch auf andere Weise zur Bildung abflußloser Seebecken führen, die freilich gewöhnlich sehr bald Abfluß erhalten. Dazu gehören Bergstürze im Gebirge, die Täler abdämmen und durch Erdbeben, Durchtränken des Schutts mit Wasser oder sonstige Gleichgewichtsstörung hervorgerufen werden können. Aehnlich wie Lavaströme können Gletscher — z. B. in Grönland — und Dünen zur Abdämmung von Flußbetten führen. Deshalb sind abflußlose Seen in Dünengebieten, wofern nicht ein Trockenklima vorliegt, häufige Erscheinungen. Das Dünengebiet der Gascogne sei als Beispiel genannt. Eine Kombination von mariner und äolischer Tätigkeit sind die Nehrungen der Flachküsten. Die entstehenden Haffe sind oft genug dauernd oder periodisch abflußlos, weil entweder niemals oder nur zeitweilig ein Tief die Verbindung mit dem Meer herstellt. Die Flachküste der Gascogne kann ebenfalls hier genannt werden neben vielen anderen Flachküsten der feuchten Regionen.

Wenn Inlandeismassen infolge von Klimawechsel abschmelzen und die in Eis eingeschlossenen Schuttmassen zusammensinkend liegen bleiben, entsteht ein sehr unregelmäßiges Relief, bestehend aus Vertiefungen zwischen Rücken und Platten, in denen sich Wasser ansammeln kann. Namentlich bilden Endmoränenzüge gern Staudämme für die Wasseransammlungen der Zungenbecken. Freilich haben gerade solche Randbildungen gewöhnlich längst Abfluß erhalten, wenn sie überhaupt je abflußlos waren.

3. Die Seebecken. Innerhalb des Beckens liegt der See und der von ihm eingenommene bezw. von dem Wasser beeinflußte Teil ist das Seebecken. Hinsichtlich der Bezeichnungen für die einzelnen Teile des Seebeckens, des Bodens und der Gehänge, der Küste und des Strandes gelten die dem Handbuch von Forel entnommenen üblichen Bezeichnungen (20). Hier kann es nur darauf ankommen, die für abflußlose Seen charakteristischen Erscheinungen herauszuheben.

Die Tiefe der abflußlosen Seen ist im allgemeinen sehr gering, manchmal nicht mehr als einige Meter, ja selbst nur $^{1}/_{2}$ m. Die überschwemmbare Zone ist in solchen Fällen sehr breit und umfaßt bei periodischen Seen manchmal das ganze Seebecken. Tiefe Seen sind entschieden die Ausnahme und zeigen dann mitunter wegen des heftigen Wellenschlages erhebliche Brandungserscheinungen mit Kliffbildung. Allein ganz überwiegend sind die Ufer durch fortschreitende Sedimentbildung unter Verkleinerung und Verflachung der Seebecken, ausgezeichnet. Andererseits sind aber alte, disharmonische Kliffs und Strandterrassen keine Seltenheit. So hat der Bonnevillesee (24) in einer ca. 1000 Fuß über dem Seeboden gelegenen Zone eine große Anzahl von Terrassen, von denen einzelne Systeme besondere Namen erhalten haben und nach Hedin (29) besitzen auch die Seen Tibets bis 133 m hoch über dem jetzigen Seespiegel liegende Terrassen — ein unzweideutiger Beweis für den einstigen größeren Wasserreichtum. Solche Terrassen weisen auf Süß- oder Brackwasser hin, da das konzentrierte Salzwasser nicht zu Wellenbildung neigt.

An demselben See kann man auch eine auffallende Verbiegung der Strandterrassen feststellen und zwar in der Art, daß Gilbert (24) eine zentrale Aufbiegung des Seebeckens glaubt annehmen zu müssen, hervorgerufen

durch die infolge des Schwindens des Wassers eingetretene Entlastung.

4. Die Wasserverhältnisse abflußloser Seen. Die abflußlosen Seen weisen gegenüber solchen mit oberflächlichem Abfluß mancherlei Eigentümlichkeiten auf, die sich namentlich auf die Herkunft des Wassers, die Zufluß- und etwaigen unterirdischen Abflußverhältnisse, die Beschaffenheit des Wassers und sonstige besondere Eigentümlichkeiten abflußloser Seen beziehen.

4a) Die Herkunft des Wassers ist recht verschiedenartig. Gewöhnlich stammt es aus mehreren Quellen, wenn auch zuweilen ein bestimmter Ursprung überwiegt. Einmal wäre zu nennen das unmittelbar vom Himmel fallende Regenwasser, wenn dieses Gelegenheit hat, sich in geschlossenen Hohlformen zu sammeln. So entstehende Teiche sind namentlich in Steppengebieten außerordentlich verbreitet und auch die auf dem Gipfel untätiger Vulkane gelegenen Kraterseen haben wohl oft kaum eine andere Quelle als das Regenwasser.

Das in die Tiefe eingedrungene Regenwasser kann entweder in Form des flächenhaft an Schuttboden oder Gestein auftretenden Grundwassers oder des in Adern zirkulierenden Quellwassers in geschlossenen Hohlformen austreten. Solche Grundwasserseen sind z. B. in glazialem Schuttland Norddeutschlands häufige Erscheinungen. Schließlich sind die hauptsächlich durch Flußwasser gespeisten Seen in Deltas und Ueberschwemmungszonen von Flüssen, sowie die Endseen zu nennen, während in Haffen neben dem Flußwasser auch das Meerwasser, das über die Nehrung geschleudert wird, als periodische Verbindung des Haffs mit dem Meer in erstere gelangt, eine Rolle spielt. Bei Gebieten mit starkem Schneefall und Gletschern wird die Abschmelzperiode von entscheidender Wichtigkeit.

4b) Schwankungen des Wassers sind in erster Linie von der jahreszeitlichen Verteilung des Niederschlages abhängig und gerade für den Charakter abflußloser Seen oft von entscheidender Bedeutung. Man hat abflußlose Seen mit dauerndem, regelmäßig periodischem und gelegentlichem Wasser zu unterscheiden. Zwischen dem Verhalten des Wasserstandes und der Herkunft des Wassers herrschen im allgemeinen bestimmte Beziehungen. Von Regenwasser gespeiste Seen zeigen gewöhnlich das exzessivste Verhalten. Bald nach dem Aufhören des Regens pflegen sie ganz zu verschwinden, namentlich in Gebieten mit unregelmäßigem oder periodischem Regenfall. Solche mit Grund- oder Quellwasser zeigen dagegen größere Konstanz; allein in Gegenden mit langer Trockenzeit können auch solche Seen austrocknen. Flußwasserseen sind ebenfalls von dem Wasserstand der Flüsse abhängig. Sie können unter Umständen während des Hochwassers Abfluß besitzen und erst beim Sinken des Wasserspiegels abflußlos werden.

Man könnte folgende Einteilung nach der Wasserführung vornehmen:

1. Regenwasserseen der Steppen und Wüsten mit Hochstand in der Regenzeit a) im Sommer, b) im Winter.

2. Flußwasserseen der Steppen und Wüsten mit Hochstand zur Zeit a) der Hochflut der Regenzeit; b) der Schmelzwässer von Schnee und Gletschern in der warmen Jahreszeit; c) mit doppeltem Hochstand bei getrennter Regen- und Hochwasserzeit.

3. Seen der gemäßigten Zone mit Hochstand im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze und der Herbstregen, ferner gelegentlich der Sommerwolkenbrüche.

4. Tropische Seen mit Hochstand in der Regenzeit a) bei einfacher, b) bei doppelter Regenzeit.

5. Seen der polaren Zone und Hochgebirge mit Hochstand während der Sommerschmelzwässer.

4c) Salzgehalt. Von besonderem Interesse ist die chemische Beschaffenheit des Wassers abflußloser Seen. Wenn oberirdisch abflußlose Becken einen unterirdischen Abfluß besitzen, z. B. wegen der Porosität des Gesteins und des Fehlens eines feinschlammigen Niederschlags, der die Poren zu verstopfen imstande ist, so werden solche Seen niemals salzig werden. freilich muß man noch die Voraussetzung machen, daß das speisende Wasser nicht bereits salzig ist. Dieselbe Wirkung, ein unterirdischer Abfluß durch Poren oder Spalten wird erzielt, wenn fließendes Grundwasser die Seen speist. Auch dann bleiben diese süß. So erklärt es sich, daß abflußlose Seen, die im Schuttland regenreicher Gebiete liegen, trotz der Abgeschlossenheit nicht salzig werden und für von Moränen oder sonstigen Schuttwällen abgedämmte Felsbecken in Gebirgen gilt dasselbe. Ganz anders liegen die Verhältnisse in Trockengebieten, in denen sich die bei der Verwitterung entstehenden Salze in den oberflächlichen Schichten anhäufen oder gar auf der Oberfläche ausblühen. Wo in einem aus lockeren Massen bestehenden Schuttlande das etwaige Grundwasser salzig ist, sind auch die Seen salzig und könnten in solchen Becken erhebliche Salzablagerungen entstehen. Die Salze sind recht verschiedener Art und manchmal wechselt ihre Beschaffenheit in benachbarten Seen ganz erheblich, ohne daß man imstande ist, für solches abweichendes Verhalten eine Erklärung zu geben. Der chemischen Beschaffenheit der Salze gemäß

unterscheidet man hauptsächlich drei Arten von Seen, nämlich Salzseen, Natron- und Boraxseen (59). In den Salzseen herrscht Chlornatrium vor neben Chlorkalium, Chlormagnesium, Magnesium- und Kaliumsulfat. Die Natronseen dagegen haben neben obigen Salzen besonders Natriumkarbonat und -sulfat, die Boraxseen dagegen neben Kochsalz und Soda Natriumborat. Zuweilen sind aber auch ganz andere Salze charakteristisch. So enthält z. B. die Lagune Amarga in der Puna de Atacama eine Lösung von Chlorcalcium von 1,20 spez. Gew., das der Laguna Amarilia aber enthält Alaun, der auskristallisiert eine dünne Decke auf dem Wasser bildet und 12,4 % Tonerde, 5,8 % Kali, 33,4 % Schwefelsäure enthält (11).

Die Salzmenge im Wasser ist sehr großen Schwankungen ausgesetzt, je nach der Jahreszeit und dem Verhältnis von Verdunstung und Zufluß. Manche Salzseen sind tief und enthalten relativ wenig Salze, d. h. im Verhältnis zu den Salzsteppen der Umgebung und deren salzreichen Flüssen. Loczy beschreibt diese Zustände von den Kukunor und erklärt sie wohl ganz richtig aus der geschichtlichen Entwickelung des Sees, der der Rest eines großen Süßwassersees der Diluvialzeit sei und daher immer noch relativ wenig versalzt ist (56). Die Seen mit konzentrierter Lösung, aus denen sich Salze abscheiden, sind keine Seltenheit, wie andererseits Seen mit minimalem Salzgehalt. Auffallend ist ferner der Umstand, daß innerhalb eines Sees die Salze wechseln. So führt der Eltonsee in Südrußland in manchen Jahren Chlorkalium und Gips, in anderen Jahren nicht (59). Daß auch zwischen benachbarten Seen oft ganz auffallende Unterschiede bestehen, daß Kochsalz-Natron- und Boraxseen mit wechselndem Salzgehalt nebeneinander vorkommen, haben wir bereits gesehen. Als Beispiele seien angeführt:

1. Salzsole des Eltonsees (i. J. 1863). 2. Salzsole des Beskuntschaksees (59).

	1.	2.
Schwefelsaurer Kalk	0,037	0,1
Schwefelsaure Magnesia	3,35	—
Chlornatrium	11,20	72,72
Chlorkalium	0,035	0,76
Chlormagnesium	10,72	20,80
Chlorcalcium	—	3,40
Brommagnesium	—	0,023

Bezüglich der Herkunft der Salze war man ursprünglich geneigt, sie für marin zu halten. Allein seit H. v. Schlagintweits Untersuchungen in Tibet (53, 54) hat sich immer mehr die Ueberzeugung Bahn gebrochen, daß die Salze im Lande entstehen. Zum Teil stammen sie aus Kochsalz- und Gipslagern mariner und anderer Schichten, die die Gebirge zusammensetzen, zum Teil aber bilden sie sich während der Verwitterung der kristallinen und anderer Gesteine. Das sind besonders die Alkalisulfate und -karbonate. Stelzner (55) macht auf den hohen Gehalt der Asche der Steppengewächse an Salzen aufmerksam. So enthält die Asche des Jumaholzes (Suaedea divaricata) 19,3% Kochsalz, 9,5 % Gips, 12,15% Kaliphosphat, 7,5% Kalikarbonat, 41,73% Natronkarbonat. Daß die Salze oft nur die oberflächlichsten Schichten des Bodens erfüllen, beweist das nicht seltene Vorkommen von süßem Grundwasser in geringer Tiefe unter Salzpfannen (Pampa in Argentinien, Puna de Atakama, Etoschapfanne in Deutschsüdwestafrika).

4d) Temperaturverhältnisse und Zirkulation. Die abflußlosen Seen zeigen hinsichtlich der Temperaturverhältnisse im großen ganzen dieselben Verhältnisse wie Seen mit Abfluß. Demgemäß kann man Seen von tropischem, temperiertem und polarem Charakter unterscheiden. Die ersteren haben warmes Wasser in der warmen Jahreszeit und sind nie kälter als + 4°. Die letzten besitzen kaltes Wasser, das in der warmen Jahreszeit bis 4° C steigt, in der kalten aber gefriert, die temperierten Seen zeigen eine Vereinigung beider Typen. Im Frühjahr und Sommer gleichen sie den tropischen, im Winter den polaren Seen. Hier sei nur auf einige besondere Eigentümlichkeiten abflußloser Seen hingewiesen.

Süßwasser- und Salzseen verhalten sich in mancher Hinsicht ganz wesentlich verschieden. In Süßwasserseen kühlt sich im Winter die ganze Wassermasse bis 4° C ab, weil bei dieser Temperatur das spezifische Gewicht am größten ist. Ist dieses Stadium erreicht, so kühlt sich die Oberfläche bis auf 0° C ab, worauf die Eisbildung beginnt. Im Sommer dagegen erwärmen sich die oberflächlichen Schichten durch Leitung bis zu einer gewissen Tiefe, kühlen sich nachts aber wieder ab und sinken unter. Diese abwechselnde Erwärmung und Abkühlung hat zur Folge, daß eine von der täglichen Temperaturschwankung abhängige Schicht von ziemlich gleichmäßiger Temperatur entsteht, die plötzlich — sprungweise — abnimmt. Diese Uebergangszone heißt die Sprungschicht. So fand z. B. Ed. Richter, der diese „Sprungschicht" entdeckt hat, am 17. November 1890 im Wörther See folgende Werte:

Tiefe in Metern	0	10	10,8	11	13	20
Temperatur	17,8°	17,5°	17,4°	15,2°	10,7°	6,8°

In Salzseen sind die Verhältnisse wesentlich anders. Salzwasser gefriert schwerer als Süßwasser. Das gewöhnliche Meerwasser mit 36 pro Mille Salzgehalt gefriert erst bei —2 bis 2,2 ° C. Das sehr viel salzigere Wasser

der Salzseen gefriert zum Teil wohl überhaupt nicht, höchstens bildet sich eine dünne Oberflächenschicht aus relativ salzarmem Eis über salzreicherem wärmerem Wasser. Für die Salzseen und ihre Zirkulation ist entscheidend weniger die Kälte als die Sommerhitze und Trockenheit. An der Oberfläche verdunstet das Wasser, die Konzentration steigt; damit wird das Oberflächenwasser zwar wärmer, sinkt aber doch herab. Das erwärmte konzentrierte Salzwasser erfüllt also die Tiefen des Beckens. Die Erwärmung ist um so energischer, als Salzwasser eine erheblich geringere spezifische Wärme als reines Wasser besitzt, nämlich bei 3,9% Salzgehalt ist die spezifische Wärme 0,926 gegen 1,000.

So erklärt es sich, daß die Sommerwärme eine starke Erhitzung des Salzwassers bis in bedeutende Tiefe — bei flachem Salzsee bis zum Grund — zur Folge hat und diese nur langsam abgegebene Wärme trägt das Ihrige dazu bei, das Gefrieren hintanzuhalten. Deshalb sind Salzseen oft geradezu heiß und hat man wohl manchmal die hohe Temperatur, die im Salzsee Medoc bei Szovóta in Ungarn bis auf 50° C, in Salzseen der heißen Wüste aber viel höher steigen dürfte, auf Thermen zurückgeführt — ganz unnötigerweise (vgl. Kayser, Lehrbuch der Geologie 1909 S. 400). Freilich wird auch der Erwärmung durch Konvektion schließlich ein Ziel gesetzt, weil mit dem Steigen des Salzgehalts die Verdunstung abnimmt und schließlich eine konzentrierte Sole kaum noch etwas abgibt, bezw. sie überzieht sich mit einer Salzkruste wie mit einer Eisdecke und damit wird die Insolation und Verdunstung überhaupt ausgeschlossen.

Besondere Verhältnisse entstehen, wenn ein Salzsee periodisch von einer dünnen Süß- oder Brackwasserschicht überzogen wird. Dann erfolgt hinsichtlich der Erwärmung und Zirkulation eine scharfe Grenze zwischen Salz- und Süßwasser. Abgekühltes Süßwasser sinkt nicht mehr bis auf den Grund herab, sondern nur so tief, daß sein spezifisches Gewicht mit dem des höher temperierten Salzwassers übereinstimmt. Infolgedessen geht dem tieferen Salzwasser aller Sauerstoff verloren. Tier- und Pflanzenleben wird selbst bei geringem Salzgehalt unmöglich. Im Winter aber können sich solche Salzseen leicht mit einer Eisdecke überziehen. Freilich können solche Verhältnisse nur in tieferen Seen sich ausbilden, in den meist flachen Salzseen wird durch Regengüsse und Bäche eine Durchmischung des Seewassers immer wieder erzielt.

Es verdient betont zu werden, daß genauere Studien über die Temperaturverhältnisse der Salzseen unter verschiedenen Bedingungen sehr erwünscht wären.

4e) Wellenbewegungen. In Süßwasser- und Salzwasserseen herrschen gleichgültig, ob sie Abfluß besitzen oder nicht, dieselben Bedingungen, also hinsichtlich der Wellenbewegung, des Windstaus, der Seiches, der Gezeiten. Erst bei sehr starker Konzentration der Salze dürfte eine ganz wesentliche Herabminderung der Bewegung durch Winde, Luftdruck u. a. m. eintreten, also eine Herabsetzung der Brandungserscheinungen am Ufer. Die spiegelglatte Fläche der Salzsolen ist ja so charakteristisch. Bei Verdünnung des Wassers ändern sich die Verhältnisse. Genauere Untersuchungen wären interessant.

5. Sedimente abflußloser Seen. 5a) Beschaffenheit. Es kommt ganz auf die äußeren Verhältnisse an, auf das Vorhandensein oder Fehlen von mit Sedimenten beladenen Flüssen, der Ueberschwemmungsregen, von der geologischen Beschaffenheit der Umgebung, von dem Vegetationsschutz und dem Charakter der Niederschläge, ob in einem See mechanische Sedimente in Form von Schuttkegeln, Deltas, Sand- und Schlammmassen abgelagert werden oder nicht. Es hängt von dem Salzgehalt und von der Belichtung und den Temperaturen ab, ob eine üppige Vegetation am Boden und an den Rändern des Sees gedeiht oder nicht. Letztere führt zu der Entstehung von Seekreiden, Faulschlamm, Torfmoor- und Schilfbildungen.

Besondere Bedingungen für die Entstehung von Sedimenten weisen indes doch erst die konzentrierten Salzseen auf. Wenn sich infolge von Verdunstung der Salzgehalt konzentriert, so müssen die Salze schließlich ausfallen, zuerst die am schwersten löslichen und zuletzt die löslichsten.

Am einfachsten und am leichtesten verständlich ist die Salzbildung in einem Salzsee mit periodischem Regenwasser. Die aus der Umgebung durch Regen in die Seebecken geschwemmten Salze reichern sich dort an und bleiben beim Verdunsten des Wassers zurück. So sammeln sich verschiedene Salze, deren Zusammensetzung von der Beschaffenheit der Salze der Umgebung abhängt, an, und es kommt ganz auf die äußeren Umstände an, ob Anhäufung der Salze oder Winderosion, ob mechanische oder chemische Sedimente überwiegen.

Etwas anders sind die Verhältnisse bei zuströmendem salzigem Grundwasser. Dieses enthält die Salze, die ihm von dem oberflächlich zuströmenden Regenwasser oder Quellen zugeführt werden. Das in das Salzpfannenbecken eindringende und daselbst stagnierende Wasser verdunstet und das Salz scheidet sich ab (40). Wie im einzelnen die Verhältnisse einer solchen Salzpfanne sind, hängt von den äußeren Umständen ab.

Wenn die Verdunstung den Zufluß von Grundwasser übertrifft, so entsteht eine Salzpfanne, die sich mit Salzreif und Krusten überzieht. Im umgekehrten Fall entsteht ein Salzsee, der so lange wächst, bis Verdunstung und Zufluß sich das Gleichgewicht halten. Nunmehr sammelt sich das Salz in der Sole an, bis die Abscheidung auf dem Boden des Salzsees, wo ja die schwerste konzentrierteste Lösung sich ansammelt, erfolgt.

Das Verhältnis zwischen chemischen und mechanischen Sedimenten hängt ganz von äußeren Umständen ab. Häufig sind beide aufs innigste gemischt und es erfolgt sekundär, durch kapillares Aufsteigen der Salze beim Austrocknen eine Trennung, indem eine Salzkruste den Boden des Salzsees überzieht. Ueber der Kruste können neue Sedimente sich ablagern und auf diesen aufs neue eine Salzkruste sich bilden. So kommt es, daß man beim Graben auf dem Boden einer Salzpfanne häufig mehrere Salzbänke übereinander findet, getrennt durch nassen Salzton oder -schlamm, in den man nach Durchbrechen der Salzdecke rettungslos versinkt. Die oberste Salzkruste gleicht also einer Eisdecke. Solche Verhältnisse zeigen schön die Salzpfannen der westlichen Sahara (25).

Abflußlose Seen, die von einem größeren Fluß gespeist werden, führen gar nicht so selten Süßwasser oder doch nur leicht brackisches Wasser. Falls nicht ein unterirdischer Abfluß besteht, muß man die Beschaffenheit des Wassers dadurch erklären, daß der See noch nicht lange genug abflußlos ist, also in Umwandlung begriffen ist oder auch, daß er ein Süßwassersee in der Pluvialzeit war, der allmählich versalzt (56).

Wir hatten gesehen, daß die chemischen Sedimente benachbarter Salzseen oft recht verschiedenartig sind. Zum Teil hängt dies wohl von den Gesteinen ab, die die Salze erzeugen. So sind Borax- und Chlorcalciumabsätze, wenn auch nicht ausschließlich, so doch mindestens häufig auf das Vorhandensein vulkanischer Tuffe, Laven usw. zurückzuführen, die durch das Regenwasser ausgelaugt werden oder auf juvenile Salzquellen, wie sie in jungvulkanischen Gebieten nicht selten sind. Allein häufig sind gar keine derartige Beziehungen nachweisbar.

Was nun die Abscheidung der Salze betrifft, so erfolgt dieselbe nicht gleichzeitig, sondern entsprechend der Löslichkeit in bestimmter Reihenfolge. Nach Russel (52) erfolgte im alten Lahontansee zuerst die Bildung von Kalkkarbonat, dann von Gips, dann kamen Glaubersalz, kohlensaures Natron und Kochsalz. In den Salzseen der Pampa bestehen die Salze am Rand der Lagunen oft aus Alkalisulfaten, in der Mitte dagegen aus Kochsalz (55).

Wahrscheinlich finden sehr komplizierte Vorgänge bei der Abscheidung der Salze in Salzseen statt; Blankenhorn hat die Aufmerksamkeit auf die Tätigkeit der Bakterien und höheren Pflanzen gelenkt. Im Auftrag der ägyptischen Regierung hat er diesbezügliche Untersuchungen angestellt und bringt in seiner „Geologie Aegyptens" wohl die Resultate, aber keinen Beweis für die Richtigkeit (8).

Nach seiner Auffassung zersetzen gewisse Bakterien die Sulfate, z. B. den Gips, nach folgender Formel:

$$CaSO_4 + 2H_2O + C_2 = CaS + 2CO_2 + 2H_2O.$$

Daraus entsteht durch Zerfall des Schwefelcalciums saurer kohlensaurer Kalk und Schwefelwasserstoff: $Ca(HCO_3)_2 + SH_2$. Der Schwefelwasserstoff fällt sofort das im Wasser gelöste Eisen als Sulfid aus. Von dem Schwefeleisen rühren die schwarze Farbe des Schlammes der Salzpfannen her. In den Uferpartien, wo das Salzwasser nebst dem an Schwefeleisen reichen Schlamm mit der Luft in Berührung kommen, oxydiere jenes zu Eisensulfat und dieses zerfalle rasch in sich abscheidendes Eisenhydroxyd und Schwefelsäure. Die letztere aber verwandle das Kochsalz in Natriumsulfat. Bei völliger Verdunstung scheide sich das Na_2SO_4 und überschüssige NaCl als Kruste über schwarzem nach H_2S riechendem, FeS-haltigem Schlamm ab. Blankenhorn sagt nicht, was aus dem beim Entstehen des Glaubersalzes freiwerdenden Cl wird, ob es entweicht oder zur Bildung von CaCl aus dem sauren kohlensauren Kalk verwandt wird. Auch sollte man meinen, daß freiwerdendes H_2SO_4 nicht nur das NaCl, sondern auch das $Ca(HCO_3)_2$ zersetzen muß unter Bildung von Gips. Der Prozeß könnte also ad infinitum weitergehen.

Wenn in den Salzseen reichliches Pflanzenleben, z. B. von Schilfarten, neben Algen und Spaltpilzen existiert, verläuft nach Blankenhorn der Prozeß anders. Es entstehe dann nämlich Natriumkarbonat. Lebende und abgestorbene Pflanzen seien mit diesem Salz erfüllt und von ihm inkrustiert. Das Na_2CO_3 entstehe aus Glaubersalz und aus den Pflanzen stammender Kohlenstoff nach der Formel: $Na_2SO_4 + C_2 = Na_2S + 2CO_2$; $Na_2S + H_2CO_3 = Na_2CO_3 + H_2S$. Dazu käme das Kochsalz, das sich namentlich in den Randpartien des Sees abscheide.

Indem solche Prozesse in verschiedenen Zonen eines Salzsees verschieden auftreten, entständen die so auffallenden bunten Farbenzonen des Wassers und der Sedimente. So besteht in einem Salzsee östlich des Gebel Ritale (Bezirk Mahsanah, Unter-

ägypten) die Mitte aus rotbraunem Wasser, das stellenweise schwefelgelbgrünen Algenschlamm, sowie Pflanzenwurzeln mit anhängenden Hemipterenlarven enthält. Diese rotbraune Wasserfläche wird von blaugrünem, an FsS- und H_2S-reichem Schlamm umgeben und um diesen folgt ein blendend weißer Gürtel aus schneeartigem trockenem Staub mit Wurzelstöcken von Binsen, kleinen Pflanzenteilen und Larvenleichen. Schließlich folgt schwach kochsalzhaltiger Sand, dann Klee- und Bohnenfelder.

Das sich abscheidende kohlensaure Natrium nimmt hauptsächlich die Form des Sesquikarbonats, d. h. der Trona an ($NaCO_3 + 2NaHCO_3$), aber auch reines kohlensaures Natron findet sich.

Ohne sich auf die Frage einzulassen, welche Rolle Bakterien und Pflanzen spielen und ob die von Blankenhorn gegebenen Umsetzungen genau so verlaufen, dem Eindruck kann man sich nicht entziehen, daß sehr komplizierte, entweder rein chemische oder durch Organismen angeregte Prozesse vorhanden sind, die zur Abscheidung bald dieser oder jener Salze führen und daher die auffallende Verschiedenartigkeit der Ablagerungen der Salzpfannen erklären.

Auf eine häufige Ablagerung in Salzseen sei noch besonders hingewiesen, nämlich die von kohlensaurem Kalk. Daß solcher aus den Salzsteppen der Umgebung in Massen teils chemisch, teils mechanisch in Mengen in die Salzpfannen gerät, kann bei dem Reichtum der Salzsteppen an Kalkkrusten nicht wunderbar erscheinen. In Brackwasserseen mit reichlicher Vegetation ist die Abscheidung des Kalks als Seekreide eine fast selbstverständliche Erscheinung. Die Kalkablagerung der Brackwasserseen der Diluvialzeit, in der Kalahari (41), die Kalktuffbildungen in den diluvialen Salzseen der Felsengebirgsplateaus, die Gilbert (24) und Russel (52) studiert haben, seien als Beispiele genannt. Die Absätze des Salzsees von Utah treten nach Russel in drei Formen auf, als grauer dichter sogenannter Lithoidkalk, als Thinolitkalk, der grob kristallin ist und eine Pseudomorphose nach Natrocalcit ist (Gay-Lussit); und schließlich der aus moosartigen verästelten Massen bestehende Dendritenkalk. Alle drei Kalktuffarten kommen wohl untereinander vor, allein der Dendritenkalk zieht sich doch über alle hinweg und steigt an den Rändern des alten Sees höher als irgendein anderer Kalktuff empor und überzieht den ganzen Boden des Sees. Er bildet radialstrahlig gebaute Fladen, Kugeln, Klumpen, die ihrerseits Pilze, Höcker, Türme, Klippen darstellen. Algen dürften bei ihrer Abscheidung eine große Rolle gespielt haben, in manchen Fällen auch Springquellen auf dem alten Seeboden. Da Schalen von Süßwassermollusken massenhaft im Lithoid- und Dendritenkalk vorkommen, kann das Wasser nur brackisch gewesen sein.

Bemerkenswert ist die Entstehung von Oolithen in dem Utahsee unter dem Einfluß von Algen (Gloeocapsa und Gloeoteca), die Gilbert und Rothpletz beschrieben haben (59). Aus ihnen bilden sich sogar lokal Dünen. Auch in anderen Salzseen und -pfannen, z. B. in denen des Makarrikarribeckens in Südafrika entstehen Oolithe, die in dem Salzton der Pfannen eingeschlossen sind (32).

An der Oberfläche der Salzpfannen des Makarrikarribeckens (32) entstehen auch durch Effloreszenz kieselsaurer Salze auffallende dunkelgrüne bis graugrüne, 2 bis 3 Finger dicke Krusten. Sie gehen in den salz- und kalkreichen Pelit allmählich über, enthalten Oolithe und Sandkörner, und zeigen namentlich eine auffallende breckziöse Struktur. Letztere ist durch wiederholtes Zerplatzen und Wiederverkitten entstanden — eine Struktur, die auch der liegende Salzpelit zeigt. Die Kruste aber ist durch Abscheidung von Kieselsäure entstanden und ist dabei der kalkreiche Salzpelit in ein Hydrosilikat umgewandelt worden. Die Kieselsäure stammt nach Kalkowsky, der diese Krusten eingehend untersucht hat, aus der Kieselsäure von Diatomen und Schilf, die sie ihrerseits natürlich aus Lösungen bezogen haben müssen.

Wenn sich aus einer konzentrierten Sole die am schwersten löslichen Salze und ausgeschieden haben, dann bleibt eine Mutterlauge zurück, die namentlich Chlorkalium, Chlormagnesium, Kaliumsulfat, kurz jene Verbindungen enthält, die die Abraumsalze bilden. Daß diese so selten in Salzlagern auftreten, mag einmal davon abhängen, daß sie sich so schwer abscheiden, zum Teil aber kann, wie J. Walther (59, 60) meint, die sie enthaltende Mutterlauge durch Dünen, die in die Salzsee eindringen, abgesogen und so entfernt werden. Diese Vorstellung führt aber über zu der Frage nach der Bedeutung der Salzpfannen für die Entstehung von Salzlagern, die hier wenigstens kurz berührt sei.

Im Gegensatz zu anderen Forschern, wie Ochsenius, die an eine Entstehung aus Meeressalzen denken, hält J. Walther (59, 60) die mächtigen Salzlager, wie sie z. B. in der Zechstein-, Muschelkalk- und Tertiärzeit entstanden sind, für eine Bildung in kontinentalen Salzseen. Daß in Trockengebieten einige Meter mächtige Salzlager entstehen können, ist wohl sicher, über ihre maximale Mächtigkeit wissen wir aber nichts Genaues. Daß sich recht reines Salz in Salzseen abscheiden kann, hat S. Hedin

(29. Bd. III: A Tibetan Saltlake Kap. VII) an einem Beispiel gezeigt. In Tibet fand er einen großen Salzsee, der das aus einem Süßwassersee ablaufende Wasser erhält. Letzterer See fängt die mechanischen Sedimente, die ihm ein Fluß zuführt, auf, dient also als Klärbecken, der Salzsee dagegen erhält die chemischen Sedimente und diese scheiden sich infolge alljährlicher Verdunstung in dem Salzbecken ab. Auf diese Weise können — eine geringere Zufuhr von Staub und abgeschwemmten festen Massen aus der Umgebung des Beckens vorausgesetzt — in tiefen Salzseebecken der Tiefe entsprechend mächtige reine Salzlager entstehen. Allein das sind rein theoretische Vorstellungen.

Nach Linck (33) fällt der Kalk aus Salzlösungen oft als Aragonit aus und zwar bei Abscheidung infolge von Uebersättigung in warmem Klima und fast stets beim Ausfällen aus Gips durch Natrium- oder Ammoniumkarbonat; gleichgültig ob das Wasser warm oder kalt ist. Zwar beziehen sich die Untersuchungen Lincks auf Meerwasser, in Salzseen dürften aber die Prozesse ebenso verlaufen.

5b) Bewegungserscheinungen. In Seen mit steilwandigem Becken sind Rutschungen der Sedimente keine ungewöhnliche Erscheinung. Allein es dürften sich die abflußlosen Seen hierin kaum von solchen mit Abfluß unterscheiden. Wohl aber spielen Sedimentbewegungen in Salzseen eine besondere Rolle. Diese treten einmal nach dem Austrocknen ein. In diesem Fall bestehen sie einmal im lebhaften kapillaren Aufsteigen der Salze. Es bilden sich Krusten, die gewöhnlich aus Kochsalz, Glaubersalz, Gips, Kalk, mitunter aber auch aus Kieselsäure bestehen, wie das Beispiel aus dem Makarrikarribecken beweist.

Eine andere Form der Bewegung wird infolge des Auskristallisierens der Salze hervorgerufen. Die sich in der Kruste anhäufenden und auskristallisierenden Salze rufen einen Seitendruck hervor. Die Salzkruste zerplatzt in polygonale Stücke und diese schieben sich übereinander, oder die Ränder der Polygone biegen sich nach aufwärts und zerreißen auf dem Scheitel der hand- bis faustgroßen Rücken. In Gipspfannen beobachtet man meterhohe Kuppeln aus radialstrahligen, fingerdicken Gipsaggregaten; die Kuppeln sind inwendig hohl oder doch nur unvollkommen mit Salzton gefüllt, zerplatzen und zerbrechen deshalb häufig (42).

Ferner zerplatzen Salzton und Kruste beim Austrocknen — vielleicht auch infolge der Kristallisation der Salze — und indem die Brocken durch Salz oder Salzton aufs neue verkittet wurden, kommt eine breckziöse Struktur zustande, die recht charakteristisch ist (32, 41).

Wenn sich auf einer Salzpfanne lokal Sedimentmassen ablagern, kommt es wahrscheinlich zu hypostatischen Ausgleichbewegungen in dem weichen plastischen Ton. Dann müssen die belasteten Teile einsinken und andere emporsteigen. So erklärt sich vielleicht die flachwellige Beschaffenheit großer Salzpfannen, so z. B. die der Kewire in Persien und der Wechsel der Seen innerhalb der großen Salztonflächen. Auch glaubt S. Hedin (30) mindestens in den Randpartien der Kewire erhebliche, langsame Ausgleichbewegungen, die in dem Rand der Pfanne nach dem Innern zu gerichtet sind, annehmen zu müssen. Auf den durch solche auf internen Bewegungen wahrscheinlich beruhenden Verlegungen der flachen Salzseen innerhalb der Kewire sei später eingegangen.

6. Die geschichtliche Entwickelung abflußloser Seen. 6a) Ausfüllung. Landseen sind im allgemeinen geologisch kurzlebige Gebilde und für abflußlose Seen gilt diese Behauptung in erhöhtem Maße.

Die Vergänglichkeit der Landseen beruht einmal darauf, daß sie durch mechanische Sedimente, durch Pflanzen- und Tierreste ausgefüllt werden. Abflußlose Seen sind diesem Geschick um so mehr ausgesetzt, als alle Sedimente, die hineingelangen, auch darin bleiben, und weil zu dem mechanischen auch chemische Absätze hinzutreten.

6b) Anzapfung. Sodann aber werden die abflußlosen Seen sehr häufig von Flüssen, die sich rückwärts einschneiden, angezapft und erhalten damit Abfluß; dann tritt eine totale Umwandlung der Verhältnisse ein, z. B. Entsalzung und Tieferlegung des Wasserspiegels. Ein ausgezeichnetes Beispiel bietet hierfür der Tanganikasee. Auf seine einstige Abgeschlossenheit weist noch heutzutage das Salzwasser der Tiefe und die Mollusken und Medusen von marinem Typus hin. Erst kürzlich — geologisch gesprochen — hat ihn ein Nebenfluß des Kongo, der in einer Zone weicher Sandsteine sich schneller einschneiden konnte als seine Nachbarn, angezapft und zwar bis jetzt noch so unvollkommen, daß bei Tiefstand des Wassers der See abflußlos wird. Die Verhältnisse, namentlich die Beschaffenheit des Wassers und seines Salzgehaltes sollte einmal näher studiert werden.

6c) Klimaänderung. Ein anderer Faktor, der auf die abflußlosen Seen wesentlich einwirken kann, ist die Klimaänderung. Beispiele dafür, daß im Laufe der letzten geologischen Zeit eine dauernde Zunahme der Niederschläge stattgefunden habe, ist meines Wissens kaum nachgewiesen worden, wohl aber in fast allen tropischen und subtropischen Gegenden das Gegenteil, nämlich eine Abnahme der Seen. Sie sind zusammengeschrumpft, haben ihren einstigen Abfluß zum Teil verloren und haben sich aus Süßwasserseen in Salzseen verwandelt, die immer mehr durch mechanische und chemische Sedimente ausgefüllt werden und zum großen Teil schon verschwunden sind.

Wenn vorhin gesagt wurde, daß eine dauernde

Zunahme der Niederschläge nicht festgestellt sei, so ist damit nicht gesagt, daß nicht doch ein Steigen abflußloser Seen vorkäme. Abgesehen von den flachen Regenwasserseen, die zuweilen abflußlose Steppenbecken erfüllen, z. B. Eyresee, Rukwasee u. a., kommt es auch vor, daß ein See anscheinend dauernd in ein abflußloses Wüstengebiet eingedrungen ist. Das ist nach Marquardsen beim Tsadsee der Fall. Die Inseln des östlichen Tsade sollen Reste von Dünenketten sein und die Natronlagunen, die ihn im Norden und Osten umgeben, sollen Salzpfannen der früheren Wüste sein. Im Gegensatz zu solcher Auffassung glaubt Destenave, daß die Natronlagunen heutzutage entständen, indem sie bei Hochwasser sich füllten und daß das Salz aus dem verdunstenden Wasser stamme. Er erklärt die Salzarmut des Wassers des Tsade durch eine „dénatronisation" des Sees durch die Lagunen. Allein die Verhältnisse sind noch ungeklärt. Vor allem müßte endgültig festgestellt werden, ob der Bahr el Ghasal noch in historischen Zeiten wie Nachtigal meint, Freydenberg aber bestreitet, das Tsadewasser nach Borku führte und ob ein Hindernis, z. B. Dünen den Abfluß verlegt hat. Im letzteren Fall wäre ein Steigen des Tsade und ein Eindringen in die Dünen- und Salzsteppe auch ohne Klimaänderung erklärbar.

6d) Verschüttung und Verlegung. Eine andere Erscheinung, die mit Klimaänderung nichts zu tun hat, ist das Verschieben und selbst Verschwinden von Salzseen in Wüsten und Salzsteppen in historischen Zeiten. Ein leicht verständlicher Vorgang ist die Vernichtung eines Salzsees durch Invasion von Dünen. Interessanter aber sind Verlegungen eines Salzsees infolge der Ausfüllung seines Seebeckens und der Entstehung benachbarter Seebecken durch Winderosion. In einem Seebecken, das in der Diluvialzeit von einem See eingenommen war und dessen Alluvialbecken nunmehr freiliegt, kann der Wind flache Schalen ausheben. Mündet nun in solch eine Schale ein mit Sedimenten beladener Fluß, der mit einem Salzsee endet, so kann es passieren, daß nach Ausfüllung des Sees mit Sedimenten das Flußwasser überläuft und von einem der oben genannten Winderosionsbecken Besitz ergreift. Dann erfolgt eine Verlegung des Seebeckens. Inzwischen hat der Wind auf dem verlassenen Alluvialboden leichtes Spiel, räumt den feinen Schlamm und die Salze aus, schafft ein neues Seebecken und so mag es passieren, daß nach einigen hundert Jahren der Fluß zum alten Seebecken zurückkehrt. Die Verlegung des Lop Nor in historischen Zeiten führt S. Hedin auf solche Vorgänge zurück (29 Band II).

In demselben Gebiet kann man auch die Verlegung von Seebecken durch Flußdurchbrüche feststellen, indem ein an Sedimenten reicher Strom einen Damm sich aufbaut, so daß sein Bett höher liegt als das umliegende Land. Durchbricht der Fluß an einer schwachen Stelle bei Hochwasser seinen eigenen Damm, dann bildet sich ein neuer See, während der alte austrocknet und verschwindet. Auch dieser Vorgang ist am Tarymfluß eingetreten (29).

Ein anderer Fall von Verlegung von Salzseen ist, wie oben erwähnt, in den Kewiren Persiens zu beobachten. Nach S. Hedin (30) wird die 130 bis 200:400 km große Fläche des großen Kewirs stellenweise von flachen Salzseen bedeckt. Das Wasser steht in sehr flachen Einsenkungen, die in dem feuchten glatten Salztonboden liegen. Den Boden der Salzseen bildet eine harte Salzkruste. Nun wechselt nach Hedin die Lage dieser Seen und ändern sich damit die Karawanenstraßen. Hedin meint, daß durch Einschwemmungen die flachen Schalen ausgefüllt werden und das Wasser gezwungen werde andere Vertiefungen aufzusuchen. Die Verlegung könnte aber, da Einschwemmungen nicht so tief in den Salztonflächen eindringen, vielleicht besser so zu erklären sein, daß die von den Randgebirgen eingeschwemmten Sedimente infolge der wachsenden Belastung zu Senkungen hier und sehr flachen Auftreibungen dort führen. In der weichen plastischen Tonmasse wären hypostatische Bewegungen, wie sie für die Erdkruste angenommen werden, recht wohl denkbar und Hedin selbst glaubt ja auch Bewegungen innerhalb der Tonmassen annehmen zu müssen. Damit wäre aber das Verschwinden und die Neubildung sehr flacher Einsenkungen, die sich mit Salzsole füllen und aus der sich die Salzkruste absetzt, zu erklären.

7. Geographische Verbreitung der abflußlosen Seen. Seen treten gewöhnlich gesellig auf, abflußlose erst recht. Wenn man nun einzelne Regionen unterscheiden will, in denen abflußlose Seen von bestimmtem Charakter sich finden, dann könnte man folgende Kategorien aufstellen.

7a) Abflußlose Seen der Flachküsten. Die Seebecken sind gewöhnlich durch Nehrungen abgeschlossene flache Buchten oder ertrunkene Flußtäler oder auch lediglich durch Barren an geradliniger Küste entstandene, lange, schmale, flache Vertiefungen. Das Wasser der Strandseen stammt von Flüssen, Regen und Grundwasser oder auch von übergespültem Seewasser und und ist in letzterem Fall brackisch. Unterirdischer Abfluß durch die Dünen ist wohl häufig vorhanden. Sedimente und chemische Beschaffenheit des Wassers hängen von dem Vorhandensein oder Fehlen von Flüssen und von dem Klima ab. An Steppen und Wüstenküsten entstehen periodische Salzseen, deren Salze zuweilen gewonnen werden und für die Bevölkerung eine wichtige Quelle wirtschaftlicher Einnahmen werden, wie z. B. die Salzpfanne bei Port Elisabeth, Algoa Bai (49), oder die südrussischen abflußlosen Strandseen, sowie zahlreiche Salzpfannen der Saharaküste nördlich des Senegals (25).

7b) Abflußlose Seen der Glazialgebiete. In den ehemals mit Inlandeis bedeckten und aus Glazialschutt bestehenden Gebieten Europas, Nordamerikas, Patagoniens sind abflußlose Seen eine häufige Erscheinung. Die Becken sind entweder durch Abdämmung oder Gletschererosion entstanden, kleinere wohl auch durch Aus-

strudelung von herabstürzendem Schmelzwasser unter dem Inlandeis und durch Einbruch des Schutts über allmählich auftauenden Eismassen. In regenreichen Gebieten sind wohl alle diese Seen süß und werden durch Regen- und Grundwasser, die größeren auch durch Flüsse gespeist. Demgemäß sind die Sedimente mechanischer oder organischer Natur oder auch Seekreiden. In dem im Sommer trockenen und heißen Patagonien dagegen sind solche Moränenseen bereits salzig, können auch ganz austrocknen.

Abflußlose Seen sind auch für einstmals vergletscherte Gebirge charakteristisch. Die Becken sind entweder vom Gletschereis ausgearbeitete Felsbecken oder liegen im Glazialschutt der Täler oder sind durch Moränen abgedämmte Felsbecken. Das Wasser stammt von Bächen und Quellen und hat häufig unterirdischen Abfluß, ist also süß. Nur in periodisch trockenen Gebieten sind auch Salzseen entwickelt.

7c) Abflußlose Seen vulkanischer Gebiete. Die Seen sind rundliche Maare oder Kraterseen, treten meist in großer Zahl auf und erhalten Regenwasser und Quellwasser. Die Tiefe ist oft bedeutend. Je nach dem Klima sind sie ausdauernd und haben dann wegen unterirdischen Abflusses durch den porösen Tuff oder Spalten süßes Wasser. In Trockengebieten dagegen liegen Salzseen und -pfannen in ihren Becken, z. B. im ostafrikanischen Grabengebiet und auf dem Felsengebirgsplateau (52).

7d) Abflußlose Flußseen feuchter Gebiete. Die Becken sind durch unregelmäßige Ablagerung von Sedimenten der Flüsse in Alluvialländern sowie durch Abdämmung kleiner Flüsse durch die Sedimentwälle der größeren entstanden. Sie sind wohl stets flach und enthalten Süßwasser, weil sie in den Grundwasserstrom der Tiefe eingeschaltet sind. Die Sedimente sind wohl überwiegend mechanisch, nur bei Seen ohne Zufluß mehr organischer und chemischer Natur.

7e) Abflußlose Seen ausgetrockneter Alluvialgebiete. Manche Gebiete der Subtropen waren in der Pluvialzeit mit Seen bedeckt und von Flüssen durchzogen; sie besaßen zum Teil sogar Abfluß zum Meer. Dann aber trat infolge von Klimaänderung eine Abnahme der Niederschläge ein. Seen wurden abflußlos und in Sümpfe verwandelt oder trockneten ganz aus, Flüsse wurden periodisch oder lösten sich in eine Anzahl von abflußlosen Tümpeln auf. Das Süßwasser verwandelte sich in Salzwasser, der Boden versalzte, die Vegetation wurde die einer trockenen Steppe, die Winderosion wuchs, der lockere leichte Alluvialboden der Seen erlag ihr rasch und so entstanden neue flache Becken, die sich periodisch mit Wasser füllen. Die Flüsse schwanden bis auf die größten Ströme und diese wurden oft periodisch und führten entsprechend der Abnahme der Vegetation und der Periodizität heftiger Regengüsse immer mehr Sedimente mit sich. Diese überhöhten das Bett, schufen Dämme, die, wenn sie durchbrochen wurden, zur Bildung neuer Seen in dem umliegenden tiefer gelegenen Land führten. Je nach dem Grad der Austrocknung, der Beschaffenheit des neuen Klimas und des Bodens sind so abflußlose Steppen von verschiedenem Charakter entstanden, so die Sandsteppen der Kalahari mit ihren Sand- und Kalkpfannen, Brackpfannen, Salzpfannen, die Lehm- und Sandsteppen Australiens mit ihren Tonpfannen, periodischen und aus dauernden Salzseen, ferner die Pampa mit ihren Flußalluvien, Geröll, Ton-, Löß- und Humusböden, ihren Süß- und Salzwassersümpfen (Chaco), Salzseen und Salzpfannen, das Tarymbecken mit wandernden Salzseen, Flußseen in Sand- und Lehmwüsten.

7f) Abflußlose Seen in Gebirgsschuttbecken. Einen anderen Charakter haben die abflußlosen Gebirgsländer, deren Täler und Senken mit Schutt ausgefüllt werden. Die Schuttmassen haben zu der Entstehung von abflußlosen Becken Veranlassung gegeben und an ihrer tiefsten Stelle befindet sich ein Salzsee, eine Salzpfanne, eine Salzlehmfläche oder auch ein riesiger Kewir. Meist besaßen auch diese Schuttbecken eine Pluvialzeit und sind die Salzseen häufig nur die Reste von ehemaligen Süßwasserseen, z. B. Salzsee von Utah. In heißen trockenen Gebirgsschuttboden hat der Wind häufig die Kraft Salzpfannen zu vertiefen und Becken zu bilden; Flugsand und Löß zu schaffen. Wenn die Schuttbecken jedoch so hoch liegen, daß, wie in Tibet und wohl auch auf den Hochflächen von Peru und Bolivien, der Boden während des Sommers zeitweilig von Regen durchfeuchtet wird, im Winter aber dauernd gefroren ist, kann der Wind keine Rolle spielen und herrschen daher abweichende Verhältnisse. Dort fehlen die Dünen, die die Salzseen verschütten; es fehlen die vom Wind geschaffenen Becken, daher auch die wandernden Salzseen und die Lößbecken (29 Bd. III). Eine besondere Art von Gebirgsschuttbecken sind die Lößbecken, deren Ausfüllung nicht durch von den Bergen abgeschwemmte Massen, sondern durch äolischen Staub verursacht wird. Auch sie besitzen an der oder den tiefsten Stellen einen Salzsee. China ist mit seinen Uebergangsgebieten von der feuchten Küstenzone zu der trockenen Binnenlandwüste das Paradebeispiel für solche Lößbecken mit abflußlosen Salzseen

7g) Abflußlose marine Reliktenseen. Wenn ein Land aus dem Meere auftaucht und Becken enthält, dann können abflußlose Seen entstehen, allein nur dann, wenn die Verdunstung stärker ist als die Wasserzufuhr. Sonst läuft der See über und namentlich kann er in feuchtem Klima leicht angezapft werden. In trockenem Steppen- oder Wüstenklima wird ein solches Becken aber schnell umgestaltet durch Flußsedimente, Dünensande, Löß und erhält das Aussehen einer Steppe und Wüste, so daß es oft gar nicht leicht ist nachzuweisen, ob ein solches Gebiet aus dem Meere aufgetaucht ist und ob die abflußlosen Seen Reliktenseen sind. So ist es nach O. Nordenskiölds Forschungen (38) z. B. recht zweifelhaft geworden, ob die Salzseen Patagoniens, wie Darwin (17) und Hatcher (26, 27, 28) meinten, Reliktenseen sind oder ob sie alluvialen Ursprungs sind. Auch ist es sehr zweifelhaft, ob der jetzt noch periodisch abflußlose Tanganika jemals ein mariner Reliktensee gewesen ist.

Literatur. *1. Argentine-Chilenian Boundary, 6 Bde. London 1900 bis 1902.* — *2.* **v. Baer,** *Kaspische Studien. Bull. phys. math. Acad. d. St. Petersbourg,* **XIV**, *14;* **XV**, *75.* — *3.* **Ball,** *Kharga Oasis, its Topography and Geology. Kairo 1900.* — *4.* **T. Barron,** *Topography and Geology of the District between Cairo and Suez. Kairo 1907.* — *5.* **H. J. L. Beadnell,** *Topography and Geology of the Fayum Province. Kairo 1905.* — *6.* **Derselbe,** *Farafra Oasis. Kairo 1901.* — *7.* **Derselbe,** *Dakhla Oasis, its Topography and Geology. Kairo 1901.* — *8.* **M. Blankenhorn,** *Geologie von Aegypten. Zeitschr. d. Deutsch. Geolog. Ges., 1900.* — *9.* **Derselbe,** *Entstehung und Geschichte des Toten Meeres. Beitrag zur Geologie Palästinas. Leipzig 1896.* — *10.* **Bodenbender,** *Die Pampaebene im Osten der Sierra von Cordoba in Argentinien. Petermanns Mitteil., 1893.* — *11.* **Brakebusch,** *Die Bodenverhältnisse der nordwestlichen Teile der Argentinischen Republik. Petermanns Mitteil., 1893.* — *12.* **H. Burmester,** *Physikalische Beschreibung der Argentinischen Republik. Buenos Aires 1895.* — *13.* **R. Chudeau,** *Sahara Soudanais. Paris 1909.* — *14.* **R. Credner,** *Die Reliktenseen. Petermanns Mitteil., Ergänzungsheft XIX.* — *15.* **L. Darapski,** *Zur Geographie der Puna de Atakama. Zeitschr. d. Ges. f. Erdk. Berlin 1899.* — *16.* **Derselbe,** *Das Departement Taltal. Berlin 1901.* — *17.* **Ch. Darwin,** *Geological Observations on South America. London 1846.* — *18.* **Destenave,** *Exploration des îles du Tchad. La Géographie, Bd.* **VII**, *1903.* — *19.* **Flamand,** *Recherches Géologiques et Géographiques sur le Haut Pays de l'Orane et sur le Sahara. Lyon 1911.* — *20.* **Forel,** *Handbuch der Seenkunde. Stuttgart 1901.* — *21.* **Fourean,** *Documents Scientifics de la mission Saharienne. Paris 1905.* — *22.* **Freydenberg,** *Etude sur le Tchad et le Bassin du Chari. Paris 1908.* — *23.* **E. F. Gautier,** *Sahara Algérien. Paris 1908.* — *24.* **Gilbert,** *Lake Bonneville. N. S. G. S.,* **I**. *Washington 1890.* — *24a.* **Gregory,** *The dead hart of Australia. A Journey aroud ake Eyre in the Summer 1901 to 1902. London 1906.* — *25.* **A. Gruvel et R. Chudeau,** *A Travers la Mauretanie Occidentale. Paris 1909.* — *26.* **Hatcher,** *On the Geology of Southern Patagonia. American Journal of Science, IV. Ser., Bd.* **IV**, *1897.* — *27.* **Derselbe,** *The Lake System of Southern Patagonia. Bull. Geogr. Soc. of Philadelphia,* **II**, *1900.* — *28.* **Derselbe,** *The lake System of Southern Patagonia. Amer. Geologist,* **27**, *1901.* — *29.* **S. v. Hedin,** *Scientific results of a journey in Central Asia, 4 Bde. Stockholm 1899 bis 1902.* — *30.* **Derselbe,** *Zu Land nach Indien. Leipzig 1910.* — *30a.* **W. H. Hobbs,** *Erdbeben. Leipzig 1910.* — *31. Report on the Work of the Horn Scientific Expedition to Central Australia. London-Melbourne 1896.* — *32.* **Kalkowsky,** *Die Verkieselung der Gesteine in der Kalahari. Dresden 1901.* — *33.* **G. Linck,** *Die Bildung der Oolithe und Rogensteine. N. Jahrb. f. Min. Geologie u. Paläontolog.* — *34.* **Lindsay,** *Journal of the Elder Scientific Expedition. Adelaide 1893.* — *35.* **A. Lucas,** *Soil and Water of the Wadi Tumilat. Lands under reclamation. Kairo 1902.* — *36.* **Derselbe,** *Soil and Water of the Fayum Province. Kairo 1902.* — *37.* **H. Marquardsen,** *Oberflächengestaltung und Hydrographie des saharisch-sudanischen abflußlosen Gebiets. Diss. Göttingen 1909.* — *38.* **O. Nordenskiold,** *Swenska Expeditionen fill Magellans länderna. Stockholm 1899.* — *39.* **Derselbe,** *Die Landschaftsformen der Magellanländer. Verhandl. d. VII. Internat. Geogr. Kongr. Berlin, 1901.* — *40.* **W. Obrutschew,** *Die Transkaspische Niederung. Geologische und orographische Skizze. Sapiski der Kais. russ. Geogr. Ges. St. Petersburg 1890. (Ausführliches Referat von Ed. Brückner in Petermanns Mitteil. 1895. Literaturbericht Nr. 175).* — *41.* **S. Passarge,** *Die Kalahari. Berlin 1904.* — *42.* **Derselbe,** *Verwitteruag und Abtragung in den Steppen und Wüsten Algeriens. Verhandl. d. XVII. Deutsch. Geograph. Ges. Berlin 1910.* — *43.* **Derselbe,** *Die pfannenförmigen Hohlformen der südafrikanischen Steppen. Petermanns Mitteil., 1911.* — *44.* **A. Penck,** *Morphologie der Erdoberfläche. Stuttgart 1894.* — *45.* **Posepny,** *Zur Genesis der Salzablagerungen, besonders im nordamerikanischen Westen. Sitzungsber. d. k. k. Akad. d. Wiss. Wien,* **LXXVI**, *1877.* — *46.* **R. Philippi,** *Reise durch die Wüste Atakama. Halle 1860.* — *47.* **Fr. Richthofen,** *China, Bd.* **I**. *Berlin 1877.* — *48.* **Derselbe,** *Führer für Forschungsreisende. Berlin 1886.* — *49.* **A. W. Rogers,** *An Introduction to the Geology of Cape Colony. London 1910.* — *50.* **Rolland,** *Géologie du Sahara algérien. Paris 1890.* — *51.* **Derselbe,** *Hydrologie du Sahara algérien. Paris 1894.* — *52.* **J. C. Russel,** *Geological History of Lake Lahontan. N. S. Geolg. Survey. Washington 1885.* — *53.* **H. v. Schlagintweit-Sakülünski,** *Untersuchungen über die Salzseen im westlichen Tibet und in Turkistan. Abhandl. d. bayer. Akad. d. Wiss.,* **XI**, *1871.* — *54.* **Derselbe,** *Das Auftreten der Borverbindungen in Tibet. Sitzungsber. d. bayer. Akad. d. Wiss., II. Cl., 1878.* — *55.* **A. Stelzner,** *Beiträge zur Geologie und Paläontologie der Argentinischen Republik, Bd.* **I**. *Kassel 1885.* —

56. **B. Széchenyt,** *Die wissenschaftlichen Ergebnisse der Reise des Grafen B. Széchenyi 1877 bis 1880, Bd.* **I.** *Wien 1893. — 57.* **Tietze,** *Zur Theorie und Entstehung der Salzsteppen und der angeblichen Entstehung der Salzlager aus Salzsteppen. Jahrb. d. k. k. Geolog. Reichsanstalt,* **XXVII,** *1877. — 58.* **Tschihatschef,** *Asie Mineure. Paris 1866 à 1869. — 59.* **J. Walther,** *Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. Jena 1893 bis 1894. — 60.* **Derselbe,** *Das Gesetz der Wüstenbildung. Leipzig 1912.*

S. ***Passarge.***

Segner
Johann Andreas.

Geboren am 4. Oktober 1704 in Preßburg, gestorben am 5. Oktober 1777 in Halle a. S. Er war anfänglich Arzt in Preßburg und Physikus in Debreczin, wurde 1723 Privatdozent in Jena, 1733 dort Extraordinarius, 1735 Ordinarius der Mathematik und Physik in Göttingen, 1755 in Halle. Er ist der Erfinder der Turbine oder des Segnerschen Wasserrades, das er 1755 beschrieb und theoretisch erklärte. In einer 1740 erschienenen Schrift De raritate luminis gab er eine geistreiche Verteidigung der Emanationstheorie, 1760 veröffentlichte er seine Idee von den drei Hauptachsen der Rotation.

E. ***Drude.***

Seifen.

Goldseifen, Zinnseifen, Edelsteinseifen usw. bezeichnen die sekundären Lagerstätten der betreffenden Mineralien. Es sind Sande, Kiese, Schlamm, in denen sich an einzelnen Stellen zufolge der Strömungsverhältnisse und des hohen spezifischen Gewichtes der betreffenden Mineralien diese sich angereichert haben (vgl. die Artikel „Erzlagerstätten" und „Schmucksteine").

Sekretionen.

So bezeichnet man in der Mineralogie Hohlräume die durch Abscheidung von Stoffen aus dem umgebenden Gestein mit Mineralien ganz oder teilweise erfüllt sind. Beispiel: Achatmandeln. Sie setzen den Hohlraum voraus, bilden sich also gleichsam von außen nach innen. Im Gegensatz dazu stehen die Konkretionen, die sich in Flüssigkeiten oder beweglichen Gesteinen (Sand, Schlamm) bilden. Sie setzen keinen Hohlraum voraus, haben aber entweder einen fremden Kern oder bilden selbst erst einen solchen, wachsen also gleichsam von innen nach außen. Beispiele: Manganknollen im Meere, Feuerstein in der Kreide, Schwefelkies im Ton.

Sekretion
der Drüsen mit Ausführungsgang.

1. Allgemeines über die Sekretion. Definitionen. Die Sekretion ist eines der Grundphänomene im tierischen Haushalt. Sie besteht darin, daß Zellen Wasser und gelöste Bestandteile, gelegentlich auch nicht gelöste Substanzen, abgeben oder richtiger absondern, weil das Material der Sekrete entweder unverändert oder durch Verarbeitung innerhalb der Zelle umgewandelt aus der Umgebung der Zelle stammt. Die Sekretion setzt sich demgemäß aus mindestens zwei Hauptphasen zusammen, aus einer Auslese von Stoffen aus der Umgebung der Zelle in dieselbe hinein und einer Abscheidung von Stoffen nach außen. Nun sind diese beiden Vorgänge ganz allgemein solche, welche zum Stoffwechsel jeder einzelnen Zelle gehören. Um dieselben als Vorgänge der Sekretion zu charakterisieren, müssen daher einschränkende oder näher spezialisierende Momente hinzugefügt werden.

Die erste Einschränkung ist die, daß die Absonderung nicht zu den notwendigen Lebensbedürfnissen der Zelle gehört, sondern im anderweitigen Dienste des Organismus steht. Es ist die Sekretion eine spezialisierte Funktion und hiermit steht es im Zusammenhange, daß der Sekretion eigene Zellen beziehentlich eigene Organe, die Drüsen, dienen. Alle Organe dieser Art mit einem Ausführungsgang, welcher entweder auf die äußere Hautoberfläche oder auf die Oberfläche der nach innen gelegenen Schleimhäute des Verdauungskanales mündet, sind morphologisch unmittelbar als Drüsen mit äußerer Sekretion gekennzeichnet. Diese Erkenntnis führt zu einer weiteren Einschränkung, die daraus hervorgeht, daß die Drüsen mit äußerer

Sekretion als Hauptbestandteil spezifische Zellen besitzen, welche sich zwar insgesamt vom Ektoderm oder Entoderm ableiten, jedoch im Laufe der Entwickelung morphologische Eigenschaften annehmen, welche sie als Drüsenzellen von anderen Zellen unterscheiden. Die Differenzierung schreitet derart fort, daß jede einzelne Drüse ihren typischen Zellcharakter besitzt. Funktionell hat diese Tatsache den für die Drüsenlehre einst hochbedeutsam gewordenen Schluß gezeitigt, den Johannes Müller gezogen hat, daß das Wesentliche an der Sekretion die Eigenschaften und Leistungen der lebendigen Substanz der Drüsenzelle seien. Aus der Tatsache, daß die Sekretion ein spezialisierter Lebensvorgang ist, ergibt sich von selbst, daß die Sekretion erst bei mehrzelligen Lebewesen mit Sicherheit erkannt und analysiert werden kann. Erst bei diesen ist die Möglichkeit geboten, daß die Funktion einer Zelle anderen Gebilden oder Funktionen zugute kommt. Dieses letztere Moment gibt eine weitere Handhabe, den Begriff der Sekretion schärfer zu fassen. Die allgemein physiologische Leistung der Ausscheidung von Stoffen durch die Zelle hat primär den Zweck, Unnötiges und überflüssig Gewordenes abzustoßen. Dieser Prozeß ist das Endglied des für jede Zelle notwendigen und deshalb jederzeit erhalten gebliebenen Eigenstoffwechsels, er ist keine Sekretion. Zur Sekretion gehört, daß das Sekret einen Dienst leistet. Nun ist es aber bei der fortschreitenden Differenzierung des Organismus auch zur Entwickelung eigener Organe gekommen, welche zur Entfernung von Abfallstoffen des Gesamtorganismus bestimmt sind. Beispielsweise dient der Darm u. a. auch zur Entfernung von Stoffen, welche auf diesem Wege den Körper verlassen; im großen Maßstabe ist aber die Niere dasjenige Organ, welches Endprodukte des allgemeinen Stoffwechsels eliminiert, deren Verbleib im Organismus demselben teils aus physikalischen, teils aus chemischen Gründen schwere Schädigungen zufügen würde. Diese Art der Ausscheidung wird als Exkretion bezeichnet. Das die Sekretion und Exkretion unterscheidende Merkmal besteht ausschließlich darin, daß die Endzwecke des Vorgangs voneinander verschieden sind. Hingegen ist die Unterscheidung insofern keine scharf durchführbare, als die Exkretion an Organe geknüpft ist, die durchaus den morphologischen Typus von Drüsenzellen haben und der Mechanismus, welcher die Exkretion bewerkstelligt, in jeder Phase mit demjenigen der Sekretion übereinstimmt. Aus diesem Grunde hat es sich als förderlich und sinngemäß erwiesen, die Sekretion und Exkretion als einen wesentlich einheitlichen Vorgang zu betrachten. Um so verschwindender ist der Fehler, welcher hierbei begangen wird, als Sekretion und Exkretion immerhin das weitere Gemeinsame haben, daß beide Prozesse nicht im Dienste der ausführenden Zelle, sondern vor allem in dem des gesamten Organismus oder bestimmter Aufgaben desselben stehen.

Durch den Ausführungsgang geraten die Sekrete der Drüsen nach außen und an den Ort ihrer Bestimmung. Dort sind sie der Untersuchung mehr oder weniger leicht zugänglich und diese Untersuchung ergibt in der bei weitem überwiegenden Mehrzahl der Fälle ein Merkmal, welches die auf das höchste spezialisierte Eigenschaft der sekretorischen Zelle enthüllt. Es enthalten nämlich die einzelnen Drüsensekrete spezifische Substanzen, d. h. solche, welche nicht im Blute und nicht an anderen Orten des Körpers vorkommen, vor allem nicht an anderen Orten gebildet werden, sondern ausschließlich in denjenigen Drüsenzellen, welche das betreffende Sekret liefern. Es stehen offenbar diese in den Drüsenzellen gebildeten Stoffe in engstem Zusammenhange mit den Aufgaben der Drüse, indem das Sekret gerade durch den Gehalt an solchen Stoffen eine bestimmte Leistung zu vollziehen vermag. In einer sehr großen Anzahl der Fälle sind diese spezifischen Substanzen Enzyme; jedoch werden in den Drüsenzellen auch Stoffe von bekannter chemischer Zusammensetzung neu gebildet. Das Merkmal, welches wir durch die Betrachtung der am meisten spezialisierten Drüsen erhalten, besteht darin, Sekretion als Absonderung einer spezifischen Substanz anzusehen.

Im Organismus kommen Gebilde vor, deren Struktur ganz der der bisher betrachteten Drüsen gleicht, welche sich aber darin von ihnen unterscheiden, daß sie keinen Ausführungsgang besitzen. Aus morphologischen Gründen hat man diese Organe als Drüsen ohne Ausführungsgang bezeichnet, aber erst die funktionelle Erforschung hat gestattet, dieselben als Drüsen mit innerer Sekretion anzusehen. In dieser Bezeichnung liegt demnach die Behauptung, daß diese Organe ein Sekret bilden, welches an anderen Orten des Organismus seine Leistungen vollzieht. Die innere Sekretion ist demnach nur durch ein mehr äußerliches Moment von der äußeren Sekretion unterschieden, prinzipiell ist sie mit der letzteren wesensgleich. Die innere Sekretion greift so tief und ungleich bedeutungsvoller als die äußere Sekretion in die wesentlichen Prozesse des Zusammenhangs und der gesunden Lebenserhaltung des Organismus ein, daß sie sich zu einem eigenen Wissenszweig entwickelt hat (vgl. den Artikel „Sekretion. Innere Sekretion“). Was aber den Mechanismus der inneren Sekretion anlangt,

so ist er kaum von demjenigen zu trennen, welcher allgemein von dem Vorgang der Sekretion gilt. Das ist im Auge zu behalten, auch wenn die nachfolgende Darstellung sich meist auf die äußere Sekretion beschränkt.

2. Aufgaben der Sekretion. Die schon mehrfach erwähnten Aufgaben der Sekretion sind teilweise schon klar durch die Lage der sezernierenden Drüsen erkennbar. Eine große Reihe von Drüsen sind längs des Verdauungskanales angeordnet, es sind das die Speicheldrüsen, die Drüsen des Magens, die Pankreasdrüse, die Drüsen des Dünndarmes und die Leber. Das, was man Verdauung nennt, ist recht eigentlich die Leistung dieser Drüsen. Denn ihre Sekrete bauen durch ihren Gehalt an Enzymen die organischen Nahrungsstoffe ab (vgl. die Artikel über die einzelnen Verdauungsdrüsen) und machen dieselbe resorptionsfähig; auch helfen sie durch mechanische Leistungen, z. B. Verdünnen, Ueberziehen mit Schleim, Aufquellen u. a. am Verdauungsakte. Einige Drüsensekrete sind Schutzmittel gegen äußere Schädlichkeiten oder biologisch notwendige Angriffsmittel; hierher gehören in erster Linie die Sekrete der Giftdrüsen verschiedener Tiere; aber auch einige Verdauungssekrete haben nebenher solche Bestimmung, indem z. B. der Speichel der Verdünnung von Giften, der sauere Magensaft der Desinfektion dienen kann. Die Schweißdrüsen dienen der Regulation der Wärmeabgabe des Körpers und übernehmen einen je nach den Temperaturverhältnissen wechselnden Anteil der Wasserabsonderung. Die Talgdrüsen erhalten der Haut durch ihr fettiges Sekret ihre geschmeidige Beschaffenheit und schützen zugleich gegen einzelne atmosphärische Einflüsse. Die Niere leistet durch die Absonderung des Harns dem Organismus die wichtigste Regulation der chemischen Zusammensetzung des Körpers: sie entfernt die Abfallstoffe und bewahrt den Körper vor Vergiftung durch dieselben; sie eliminiert überschüssige Salze und Wasser, wodurch vor allem das Blut die für den Betrieb aller Teile unbedingt notwendige Konstanz des osmotischen Druckes festzuhalten vermag. Die Tränensekretion dient einerseits als Schutzmittel für das Auge, andererseits ist sie beim Menschen in sicher zweckmäßiger Weise in den Ablauf von Gemütserregungen eingeschaltet. Eine biologisch noch nicht aufgeklärte Sekretion ist die merkwürdige Absonderung von Leuchtstoffen, welche die Leuchtorgane zum Leuchten bringen. Schließlich vollzieht das Sekret der Milchdrüse, die Milch, seine Leistung überhaupt nicht in dem Träger der absondernden Drüse, sondern außerhalb in dem durch Abstammung allein mit dem Muttertier zusammenhängenden kindlichen Organismus.

3. Gewinnung der Sekrete. Behufs Untersuchung der Bedingungen, unter welchen die Sekrete abgesondert werden, und ihrer Zusammensetzung, müssen in erster Linie die Sekrete rein aufgefangen werden. Dies geschieht am leichtesten in denjenigen Drüsen, welche einen Ausführungsgang besitzen, durch Einbinden einer Kanüle in denselben. Durch geeignete chirurgische Maßnahmen läßt sich die Auffangung so gestalten, daß die normalen Verhältnisse möglichst wenig abgeändert werden und das Tier im Wohlbefinden verharrt. Am Magen und Darm werden Fisteln an diesen Organen angelegt.

Es zeigt sich, daß unter natürlichen Bedingungen einzelne Drüsen nur in gewissen Zeiten, andere wiederum mehr oder weniger dauernd ihr Sekret absondern. Bei denjenigen Drüsen, welche nur zeitweilig absondern — zu dieser Art von Drüsen gehören beispielsweise die reinen Verdauungsdrüsen —, liegt die nur zeitweilige Sekretion in der speziellen Leistung der betreffenden Drüse begründet, welche nur zu bestimmten Zeiten beansprucht wird. In der Zwischenzeit ruht die sekretorische Tätigkeit der Drüse, das Vermögen abzusondern ist nicht dauernd vorhanden, sondern muß erst hervorgerufen werden. Anders bei denjenigen Drüsen, welche mehr oder weniger dauernd absondern. Zwar wird auch bei diesen ein An- und Abschwellen der Sekretion beobachtet, aber die Bedingungen, welche die Sekretion zustande kommen lassen, sind jederzeit insgesamt vorhanden.

4. Die Erreger der Sekretion. 4a) Sekretorische Nerven. Die Drüsen mit zeitweiliger Sekretion sind die geeigneten Objekte, um zur Kenntnis der Erreger der Drüsensekretionen zu gelangen, wobei unter Erreger diejenigen Mittel verstanden werden, welche die Sekretion in Gang bringen. Diejenigen Mittel, deren der Organismus sich selbst bedient, sind die normalen Erreger, wohingegen die wissenschaftliche Untersuchung zwar jederzeit bestrebt ist, durch die experimentelle Analyse die natürlichen Erreger zu identifizieren, bei der Lösung ihrer Aufgabe jedoch auch genötigt ist, künstliche Reize anzuwenden. Die künstlichen Reize sind einerseits teilweise identisch mit den natürlichen, andererseits liefern sie wertvolle Ergänzungen des Tatsachenmaterials, indem sie die Kenntnisse der Bedingungen, unter welchen die Sekretion stattfindet, erweitern.

Unabhängig von der Frage der natürlichen oder künstlichen Erreger gibt es zwei Hauptmittel, die Sekretion anzuregen, nämlich erstens die nervöse Erregung, zweitens chemische Mittel.

Alle Drüsen, solche mit äußerer wie innerer Sekretion, sind mit Nerven versehen.

Ob diese Nerven zum Sekretionsakt unmittelbare Beziehung haben, kann nur das Experiment entscheiden. Trotz aller Fortschritte der histologischen Technik sind die Angaben über direkte Endigung an oder gar in den Drüsenzellen, wo sie überhaupt nachweisbar erschien, noch mit großer Unsicherheit behaftet. Andererseits enthält die Drüse außer den spezifischen Zellen noch andere Formelemente, insbesondere Gefäße. Die Drüsengefäße nun sind bei allen Drüsen mit Gefäßnerven versehen, sowohl verengernde wie erweiternde Gefäßnerven und der exakte Nachweis derselben ist dadurch geliefert worden, daß experimentell durch die hierzu geeigneten Methoden Gefäßverengerung und Gefäßerweiterung auf Nervenreiz hin beobachtet wurden. Das Experiment hat dahin entschieden, daß es echte sekretorische Nerven gibt.

Der klassische Ort für den Nachweis der sekretorischen Drüsennerven ist die Unterkieferspeicheldrüse (Glandula submaxillaris) z. B. vom Hund oder von der Katze, dieselbe Drüse, welche wegen der Vereinigungen aller Bedingungen, die überhaupt bei der Drüsensekretion in Betracht kommen können, und wegen ihrer leichten Zugänglichkeit und Isolierbarkeit wie kaum ein anderes Gebilde für alle prinzipiellen Fragen der Sekretionslehre wegleitend geworden ist. Die Unterkieferspeicheldrüse wird von zwei Nerven versorgt, erstens der Chorda tympani, einem Zweig des Nervus lingualis (Ast des V. Hirnnerven, des Trigeminus) und zweitens von sympathischen Nervenfasern, welche vom Halssympathicus herkommen. Reizung der Chorda tympani mit Hilfe des Induktionsstroms ruft prompt Speichelabsonderung hervor, je nach der Reizstärke ist die Absonderung verschieden stark. Nun enthält aber die Chorda tympani auch mächtige gefäßerweiternde Fasern. Da Gefäßerweiterung eine Begleiterscheinung der normalen Sekretion ist, muß ausgeschlossen werden, daß nicht diese etwa die Ursache der Speichelabsonderung auf Chordareizung ist. Dieser Ausschluß gelingt mit Hilfe des Giftes Atropin, der wirksamen giftigen Substanz in der Belladonna (Tollkirsche). Nach Atropinvergiftung ruft zwar Chordareizung wie vorher Gefäßerweiterung hervor, aber keine Speichelabsonderung. Diese experimentelle Trennung hat zuerst die Existenz von echten sekretorischen Nerven, d. h. Nerven, deren Funktion es ist, durch unmittelbare Einwirkung auf die Drüsenzelle Sekretion hervorzurufen, gesichert. Ein weiterer Beweis liegt in dem Umstand, daß es kurze Zeit nach dem Tode noch gelingt, an der Drüse ohne Kreislauf durch Chordareizung Sekretion anzuregen. Was die sympathischen Nervenfasern anlangt, so bewirkt deren Reizung gleichzeitig Gefäßverengerung, eine Wirkung, welche offenkundig nichts mit der Sekretion zu tun hat, woraus ohne weiteres die Selbständigkeit dieser Art von sekretorischen Fasern hervorgeht.

Die Unterkieferspeicheldrüse wie überhaupt alle Arten von Speicheldrüsen sind nicht die einzigen Drüsen, bei denen durch die experimentelle Reizung das Vorhandensein echter sekretorischer, die Absonderung beherrschender Nerven festgestellt worden ist. Die Absonderung des Magensaftes kann durch Reizung des Nervus vagus (des X. Hirnnerven), diejenige des Pankreassaftes wie bei der Speicheldrüse durch Reizung zweier Nerven, nämlich gleichfalls des Nervus vagus und von sympathischen Nervenfasern hervorgerufen werden. Die Absonderung des Schweißes sowie der Tränen ist, wie das Experiment lehrt, sekretorischen Nerven unterstellt. Bei den Drüsen mit innerer Sekretion ist der Nachweis von echten sekretorischen Nerven deshalb schwieriger, weil das so leicht erkennbare Merkmal der äußeren Sekretion fehlt; er kann nur dort erbracht werden, wo das spezifische Sekretprodukt beziehentlich — und das ist praktisch bis jetzt das einzig realisierbare — die spezifische Wirkung dieses Produktes bekannt ist. Mit Hilfe von solchen spezifischen biologischen Wirkungen ist gezeigt worden, daß Reizung von Nerven Absonderung der Nebenniere und der Schilddrüse hervorruft, indem durch Reizung des Nervus splanchnicus dieselbe Wirkung wie durch Injektion von Adrenalin, dem spezifischen Produkt der Nebenniere, und durch Reizung der Nervi laryngei dieselbe Wirkung wie durch Injektion von Schilddrüsenextrakten erzielt wurde.

Außer den genannten gibt es noch eine Reihe anderer Drüsen mit zeitweiliger Sekretion, welche in ganz gleicher Weise morphologisch mit Nerven versorgt werden. Es ist der Analogieschluß gestattet, daß auch hier sekretorische Nerven vorhanden sind.

Alle bis jetzt bekannten sekretorischen Nerven gehören derjenigen Klasse von zentrifugalen Nervenfasern an, welche im Gegensatz zu den die willkürlichen Muskeln versorgenden Nerven als autonome bezeichnet werden. Dieselben sind durch gewisse morphologische und funktionelle Charakteristiken ausgezeichnet, auf welche hier nicht eingegangen werden kann. Die autonomen Nerven zerfallen selbst wieder in die Unterabteilungen der autonomen Fasern sensu strictiori vom Mittelhirn, Kopfmark und Sakralmark abstammend und der sympathischen vom Brust- und Lendenmark. Einige Drüsen, z. B. die Speicheldrüsen und die Pankreas-

drüsen werden von beiden Sorten Nerven versorgt. An einigen Orten des Organismus hat diese doppelte Innervation die Bedeutung, daß hierdurch die antagonistischen Wirkungen der Erregung und Hemmung ermöglicht werden. Bei den Drüsen tritt diese Art des Gegensatzes nicht auf, aber wo beide Arten von Nerven vorhanden sind, kann ein merklicher Unterschied der Wirkung beider Faserarten zutage treten. Am ausgeprägtesten ist diese Erscheinung an der Unterkieferspeicheldrüse des Hundes, wo Reizung der autonomen Chorda tympani Absonderung eines reichlichen, dünnflüssigen Speichels, während diejenige der sympathischen Fasern Absonderung eines zähen, an organischen Stoffen reichen Speichels veranlaßt.

4b) Einfluß von Giften. In einem nahen Zusammenhange mit der Innervation der Drüsen steht das Verhalten der Sekretion gegen gewisse Gifte. Das oben erwähnte Atropin hebt die unter natürlichen Bedingungen eintretende Absonderung des Speichels und des Schweißes auf, und zwar aus dem Grunde, weil die Erregung der sekretorischen Nerven unwirksam geworden ist. Der Absonderungsvorgang selbst ist durch Atropin nicht gestört, was u. a. dadurch bewiesen werden kann, daß Reizung des Sympathicus noch Speichelabsonderung verursacht, eben weil dieser Nerv an dieser Stelle durch Atropin nicht gelähmt wird. Umgekehrt gibt es Gifte, durch welche eine intensive Absonderung angeregt wird. Ein Prototpy eines derartigen Giftes ist das Pilocarpin, nach dessen Applikation profuse Speichel- und Schweißabsonderung einsetzt. Da Pilocarpin gerade dort erregt, wo das Atropin lähmt und da durch starke Atropindosen die Wirkung von Pilocarpin aufgehoben werden kann, liegt der Schluß nahe, daß Pilocarpin die sekretorischen Nerven erregt. Ein tieferes Eindringen in die vorliegenden Verhältnisse hat es wahrscheinlich gemacht, daß der Angriffsort dieser Gifte nicht eigentlich der Nerv, sondern eine an der Endstätte des Nerven gelagerte eigentümliche rezeptive Substanz sei. Prinzipiell wird durch diese Annahme nichts geändert, da die rezeptive Substanz nur Bedeutung als Angriffsort nervöser Erregungen gewinnt.

4c) Anpassung und nervöse Erregung. Innerhalb des Organismus werden die sekretorischen Nerven ausnahmslos auf reflektorischem Wege erregt, d. h. durch Reize, welche in der Peripherie an sensiblen Nervenendigungen angreifen. Von dort werden die Erregungen nach dem Zentralnervensystem geleitet und auf die sekretorischen Nerven übertragen. Keine einzige Drüse kann willkürlich zur Absonderung gebracht werden, sie sind gänzlich der Herrschaft des Willens entzogen, womit im Einklang steht, daß die sekretorischen Nerven dem autonomen Nervensystem angehören. Eine scheinbare Ausnahme bildet die Tränendrüse des Menschen, scheinbar deshalb, weil wir willkürlich nur die Stimmung entstehen lassen können, welche den Tränenfluß veranlaßt. Die peripheren Reize sind mannigfacher Art und es erweist sich, daß diejenigen sensiblen Nervenendigungen, von welchen aus Sekretion ausgelöst werden kann, auf das feinste an alle diejenigen Reize angepaßt sind, auf welche die Absonderungen der betreffenden Drüse eine im Interesse des Organismus oder im Interesse ihrer speziellen Aufgabe liegende Reaktion auszuüben vermögen. Säuren, Laugen, konzentrierte Lösungen von Kristalloiden, schlecht oder intensiv schmeckende Substanzen rufen reflektorisch Speichelabsonderung hervor. Die Feinheit der Anpassung verrät sich vor allem darin, daß die Zusammensetzung des gelieferten Speichels ganz der zu bewältigenden Aufgabe entsprechend ist. Wie nicht anders zu erwarten, ist diese Anpassung bis auf das feinste gegenüber der physikalischen und chemischen Beschaffenheit der mit der Mundhöhle normal in Berührung kommenden Nahrungsmittel durchgeführt. Dasselbe Prinzip beherrscht die Beziehungen zwischen eingeführter Nahrung und abgesondertem Magensaft. Je nachdem Milch, Fleisch oder Brot eingenommen wird, fließt ein Magensaft anderer Menge und Zusammensetzung und beide Faktoren stehen in engstem Zusammenhange mit der jeweilig zu bewältigenden Aufgabe. Daß alle hier als Beispiele erwähnten Anregungen der Drüse durch bestimmte Reize zu bestimmter Tätigkeit spezifische nervöse Reflexe sind, geht daraus hervor, daß nach Durchtrennung der Nerven die Spezifität der Absonderung verschwunden ist. Es bleibt auf chemische Reize hin allerdings noch Absonderung erhalten — somit sind noch andere Wege der Auslösung der Sekretion außer fein abgestufter nervöser Sensibilität verfügbar — aber das ergossene Sekret zeigt keinerlei Anpassung mehr an die besonderen Aufgaben unterschiedlicher Reize.

Die Drüsenabsonderung tritt schließlich in Beziehung zu der Funktion höchster Entwickelungsstufe, indem sogar psychische Reize zu den normalen Erregern von Drüsenabsonderung gehören können. Das gilt nicht allein von der von den Gemütsbewegungen abhängenden Tränenabsonderung, sondern auch von Speichel- und Magensaftsekretion. Gesicht, Geschmack, Geruch und Gehör vermögen den Fluß dieser Säfte anzuregen und, ohne daß irgendeine bewußte Tätigkeit ordnend hier eingreift, ist die Zusammensetzung des Saftes derart,

daß sie der Beschaffenheit des nur durch Sinneseindrücke wirkenden Reizes entspricht.

Fragt man sich, wie diese durch ihre Mannigfaltigkeit sowohl der Reizempfänglichkeit wie der Beantwortungsart fast verblüffend angepaßte Sekretionstätigkeit entsteht, so begegnet man zunächst der großen Schwierigkeit, daß der allein hierfür verantwortlich zu machende nervöse Apparat nach unseren heutigen Vorstellungen nur das Einerlei der starken und schwachen Reize kennt. Es sind Anfänge der Kenntnisse vorhanden, welche dafür sprechen, daß passende Kombinationen von Reizen verschiedener Stärke alle möglichen Zusammensetzungen des Sekretes zu erzielen imstande sind. An der Speicheldrüse konnte gezeigt werden, daß die verschiedenen tatsächlich beobachteten Zusammensetzungen des Speichels durch Reizungen von Chorda tympani und Nervus sympathicus erzielt werden konnten, welche je nach der gewollten Zusammensetzung in verschiedener Reizstärke und Dauer zusammengesetzt wurden. Wenn auf diese Weise auf der zentrifugalen Seite des Reflexbogens die auf einen oder zwei Nerven verteilte Intensität und Dauer des Reizes zur Erklärung auszureichen scheint, so wird man auch auf der sensiblen Seite sich mit diesen einfachen Faktoren begnügen müssen, um so mehr, als kein Anhaltspunkt vorliegt, welcher ein Auswahlvermögen anderer Art durch nervöse Apparate anzunehmen gestattet.

4d) Chemische Erreger. Sekretine. Das zweite Mittel, um die Sekretion anzuregen, ist chemischer Art. Es ist vielleicht kein Zufall, daß gerade bei Drüsen mit dauernder Sekretion der Nachweis der Beeinflussung der Sekretion durch sekretorische Nerven bis jetzt mißglückt ist. Das gilt z. B. von der Absonderung der Galle durch die Leber und die Absonderung des Harnes durch die Niere. Nicht etwa, daß diese Organe nicht mit Nerven versehen werden; gerade die Niere hat eine sehr reichliche Versorgung mit Nerven. Aber keinerlei Reizung der zur Niere gehenden Nerven vermag die Absonderung des Harnes so zu beeinflussen, daß ein Rückschluß auf sekretorische Nerven möglich wäre[1]). Bis jetzt sind von den zur Leber und zur Niere ziehenden Nerven nur Wirkungen auf die Gefäße bekannt. Die erregenden und lähmenden Nervengifte Pilocarpin und Atropin versagen eindeutige Auskunft. Diesen negativen Ergebnissen steht die positive Tatsache gegenüber, daß auf chemischem Wege eine Erregung der beiden Drüsen zur Sekretion, oder richtiger gesprochen, da die Drüsen ja kontinuierlich absondern, eine Steigerung der Sekretion möglich ist, wobei die chemischen Mittel auf dem Wege des Blutes die Drüsenzellen erreichen. Interessanterweise sind in erster Linie solche Stoffe chemische Erreger der genannten Drüsen, welche von ihnen selbst ausgeschieden werden. In der Galle werden als spezifische Produkte der Leberzelltätigkeit die Gallensäuren und der Gallenfarbstoff ausgeschieden und gerade diese beiden Stoffklassen sind es, welche lange Zeit als die einzigen echten Erreger der Gallenabsonderung, als Cholagoga, mit Sicherheit erkannt waren. Eine Reihe von Vergiftungen, welche von erhöhter Gallenabsonderung begleitet sind, wirken dadurch, daß sie Blutkörperchen zerstören und infolge hiervon den Blutfarbstoff Hämoglobin frei machen, welcher die Vorstufe des Gallenfarbstoffes ist und in der Leberzelle hierzu umgewandelt wird. Die Anregung der Gallenabsonderung durch die spezifischen Gallenbestandteile ist kein Kunstprodukt, sondern die Nachahmung des wirklichen Vorganges, da nachgewiesen werden konnte, daß die Galle im Organismus eine Art Kreislauf besitzt, welcher darin besteht, daß die in den Darm abgesonderte Galle von der Darmschleimhaut zum großen Teile wieder resorbiert wird und demgemäß durch den Pfortaderkreislauf wieder zur Leber zurückkehrt. Die Niere scheidet aus dem Körper, mit einer einzigen Ausnahme, nur Stoffe aus, welche im Blute vorkommen und harnfähige Stoffe genannt werden. Jede Vermehrung dieser Stoffe im Blute ruft sofort gesteigerte Harnabsonderung, Diurese, hervor, ein Verhalten, welches in zweckmäßiger Weise der Aufgabe der Niere entspricht, den Gehalt des Blutes an jenen Stoffen zu regulieren. In Uebereinstimmung hiermit steht die weitere Tatsache, daß auch die Vermehrung von Stoffen im Blute, die sonst nicht in das Blut übergehen, z. B. des Zuckers, sofort mit der Ausscheidung derselben auch vermehrte Harnabsonderung veranlaßt. Auch die Einverleibung einer ganzen Reihe von körperfremden Stoffen vermag Diurese zu erzeugen. Es besteht nach allem eine Anpassung zwischen den Erregern der Harnabsonderung und der Aufgabe, welche die Niere im Organismus zu erfüllen hat.

Es gibt aber noch eine ganz andere Art von Erregung der Drüsentätigkeit auf chemischem Wege, welche bemerkenswerterweise zuerst bei einer Drüse entdeckt wurde, welche von sekretorischen Nerven versorgt wird und nur zeitweise absondert, nämlich der Pankreasdrüse. Die Absonderung des Pankreassaftes tritt immer dann ein, wenn der sauere Mageninhalt in das Duodenum gelangt und es ist die Säure, welche hierbei das Maßgebende ist. Der Entdecker dieser

[1]) Seit der Drucklegung hat der Verfasser dieses Aufsatzes den Nachweis der sekretorischen Innervation der Niere geleistet.

Tatsache dachte zuerst nur an einen Reflex. Diese Annahme mußte aber fallen gelassen werden, als gezeigt werden konnte, daß ein mit Hilfe von Säure in der Konzentration des Magensaftes bereiteter gekochter und neutralisierter Extrakt aus Duodenalschleimhaut in die Blutbahn injiziert prompt Pankreassaftabsonderung hervorruft. Es konnte dieselbe Wirkung auch mit Blut aus einer Duodenalschlinge, welche mit Säure angefüllt worden war, erzielt werden. Die Säure des Magensaftes (es sind jedoch auch andere Säuren hierzu befähigt) macht in der Duodenalschleimhaut eine Substanz, offenbar aus einer Vorstufe, frei, welche auf dem Blutwege zu den Pankreasdrüsenzellen gelangt und dort die Sekretion anregt. Diese Substanz erhielt den Namen Sekretin. Es ist insofern spezifisch, als es nur aus der Schleimhaut des Duodenums und des oberen Teiles des Ileums gewonnen werden kann; hingegen ist das Sekretin der einen Tierart auch bei jeder anderen wirksam. Das Sekretin ist das Prototyp der Substanzgruppe, welche man als Hormone bezeichnet hat, Stoffe, welche an einem gegebenen Ort und zu einer bestimmten Zeit, genau den Bedürfnissen entsprechend, entstehen und auf dem Blutwege an die Stätte ihrer Wirksamkeit gelangen. Die Hormone sind demgemäß Vollzieher einer chemischen Regulation, welche in nicht minder feiner und angepaßter Weise wie die nervöse Regulation arbeitet. Außer dem Pankreassekretin ist noch ein Magensaftsekretin entdeckt worden, welches durch Einwirkung gewisser Nahrungsbestandteile auf die Schleimhaut des Magens entsteht. Da gerade die Verdauungsdrüsen mit Ausnahme der Speicheldrüsen auch nach vollständiger Trennung vom Zentralnervensystem auf gewisse Nahrungsbestandteile mit Saftsekretion reagieren, ist es wahrscheinlich, daß die Sekretine chemische Erreger allgemeineren Vorkommens darstellen (s. für das Spezielle den Artikel „Verdauung"). Auf diese Weise hätten wir die Möglichkeit, daß ein und dieselbe Drüse auf zwei Wegen, dem nervösen und dem chemischen (oder wie man letzteren Weg auch genannt hat, dem humoralen) zur Tätigkeit erregt wird. Welcher von beiden im Einzelfalle unter natürlichen Bedingungen begangen wird, hängt von Umständen ab, welche noch wenig bekannt sind. Eine wesentliche Rolle scheinen hierbei die zeitlichen Verhältnisse zu spielen. Da, wo ein rasches Einsetzen der Sekretion am meisten den Bedürfnissen entspricht, ist der rascher reagierende nervöse Mechanismus der geeignete, dort, wo ein langsameres Einsetzen und dabei länger andauerndes Bestehen der Sekretion den Anforderungen am ehesten Genüge leistet, ist der chemische Weg derjenige, welcher benutzt wird. Der große Vorzug der chemischen Regulation der Sekretion liegt in der Unabhängigkeit vom Zentralnervensystem und deshalb ist dieselbe um so überwiegender, ein je weniger entwickeltes Nervensystem vorhanden ist. Diese Erwägung ist der Grund, weshalb man die chemische Erregung der Drüsensekretion als das phylogenetisch ältere Prinzip betrachtet hat. Die chemische Regulation erweist sich ferner als das mehr ökonomische und einfachere Mittel zur Erregung der Sekretion, wenn solche nur in ganz begrenzten Perioden des Lebens auftritt. Ein typisches Beispiel ist die Milchsekretion. Sobald die Zeit des Bedürfnisses für das Vorhandensein von Milch auftritt, werden von den weiblichen Genitalorganen her Stoffe, Hormone abgegeben, welche die Milchdrüse zur Absonderung anregen. Die Unabhängigkeit der Milchsekretion vom Nervensystem geht daraus hervor, daß nach Unterbrechung jeder nervösen Verbindung zwischen Genitalorganen und Milchdrüse, beispielsweise nach Rückenmarksdurchschneidung, noch normal Milchsekretion eintritt. Beiläufig verdient hervorgehoben zu werden, daß auch die Entstehung des absondernden Zellgewebes selbst der Milchdrüse unter dem Einflusse von Hormonen stattfindet, welche aus dem Fötus stammend dem mütterlichen Blut zuströmen. Somit ist jedes Glied an der Kette dieses Sekretionsaktes die Schöpfung einer nur zeitweilig bestehenden Gelegenheit, das Organ selbst und die Erreger desselben. Ein strukturell festgelegtes Nervensystem wäre für die Zwecke dieses Apparates etwas Ueberflüssiges.

5. Vorgänge innerhalb der Drüsen während ihrer Tätigkeit. An denjenigen Drüsen, welche schärfer abgrenzbare Perioden der Ruhe und der Sekretion besitzen, lassen sich eine Reihe von Vorgängen beobachten, welche den Zustand der Tätigkeit begleiten. Doch auch in Drüsen, bei denen nur von einem Wechsel geringerer und stärkerer Absonderungstätigkeit die Rede sein kann, entsprechen der letzteren im großen und ganzen analoge Vorgänge.

5a) Aenderungen am Kreislauf. Der Kreislauf verhält sich in einer ruhenden und tätigen Drüse durchaus verschieden. Hand in Hand mit der Absonderung geht eine stärkere Durchströmung der Drüse. Aus der stark Speichel absondernden Unterkieferspeicheldrüse entströmt der Vene das Blut hellrot und pulsierend, ähnlich wie aus einer Arterie, mit einer vielfach vermehrten Durchströmungsgeschwindigkeit. In der Pankreasdrüse, welche sich bei geeigneten Tieren, z. B. dem Kaninchen, während der Absonderung unter dem Mikroskop beobachten läßt, zeigt sich die gleiche Erweiterung der

Gefäße, insbesondere der Kapillaren. Die Schleimhäute des Magens und des Darmes sind während der Sekretion der Verdauungssäfte infolge von Gefäßerweiterung tief gerötet. In der Niere findet überwiegend bei vermehrter Harnabsonderung eine starke Steigerung der Blutdurchströmung statt. Das Zweckmäßige dieser Einrichtung ist offenkundig; mit der vermehrten Blutdurchströmung wird der absondernden Drüse die Zufuhr von allen den Materialien gewährleistet, welche an der Bildung der Sekrete beteiligt sind. Mit Rücksicht auf die Theorie der Sekretion ist gleich hier hervorzuheben, daß, weil die vermehrte Blutdurchströmung absondernder Drüsen zweckmäßig und förderlich ist, sie deshalb nicht etwa eine zwangsweise Bedingung der Sekretion ist. Denn, wie schon früher erwähnt, kann auch die blutlose Speicheldrüse noch kurz zur Sekretion gebracht werden und die gesteigerte Harnabsonderung kann ohne jede Erhöhung der Blutstromgeschwindigkeit einhergehen. Umgekehrt können experimentell alle diejenigen Veränderungen, welche am Kreislauf während gesteigerter Tätigkeit der Niere zur Beobachtung gelangen können, herbeigeführt werden, ohne daß überhaupt eine Absonderung durch die Niere eintritt.

5b) Respiratorischer Stoffwechsel. Die Drüsen haben während ihrer Tätigkeit einen erheblich vergrößerten respiratorischen Stoffwechsel. Die Ermittlung dieser Tatsache geschieht dadurch, daß der Sauerstoff und Kohlensäuregehalt des in die Drüse eintretenden arteriellen und des dieselbe verlassenden venösen Blutes im Zustand der Ruhe und der Absonderung bestimmt wird. Hierbei ergibt sich allgemein, daß während der Absonderung der Sauerstoffverbrauch und die Kohlensäurebildung wächst. Beispielsweise fand sich an der Submaxillaris der Katze:

Messung des Gaswechsels in cm³ pro Minute

	ruhend		Chordareizung	
	O_2	CO_2	O_2	CO_2
I	0,000	0,083	0,145	0,261
II	0,026	0,020	0,080	0,124

und bei der Niere fand sich:

	Vor der Diurese ccm	Während der Diurese ccm	Bei abkling. Diurese ccm
Sauerstoff absorbiert pro Minute	3,35	15,6	5,0
CO_2 pro Minute	8,05	13,8	3,5
Urinmenge pro Minute	0,13	0,96	0,36

Ganz ähnliche Befunde wurden bei der Pankreasdrüse gemacht.

Aus diesen Tatsachen ergibt sich, daß mit der Sekretionstätigkeit ein reger Stoffwechsel einhergeht. Aus der verbrauchten Sauerstoffmenge läßt sich die Größe der frei gewordenen chemischen Energie berechnen. Dieselbe erreicht sehr ansehnliche Werte. Beispielsweise betrug die während einer Minute frei gewordene Energie in einer ruhenden Niere 163000 cm/g, in einer stark absondernden Niere hingegen nicht weniger als 873000 cm/g. Diese Zahlen sind sehr wertvoll, um darauf die Erkenntnis zu gründen, daß an dem Absonderungsvorgang chemische Prozesse beteiligt sind, welche in den Zellen ihren Sitz haben müssen. Es ist dies derselbe Schluß, welcher an anderen spezifischen Gewebsarten, welche den gleichen respiratorischen Stoffwechsel besitzen, gezogen wird. Der respiratorische Stoffwechsel der Drüsen hat sich noch auf eine andere Weise zeigen lassen. Es wurde nämlich der respiratorische Stoffwechsel an einem ruhenden Tier durch Untersuchung im Respirationsapparat (Bestimmung der CO_2 und des O_2 der Ein- und Ausatmungsluft) ermittelt und darauf durch das Drüsengift Pilocarpin die Drüsentätigkeit angeregt. Da jede Muskeltätigkeit ausgeschlossen worden war, war die beobachtete Steigerung der CO_2-Ausscheidung und des Sauerstoffverbrauchs auf die chemischen Prozesse in den Drüsen zu beziehen.

Da, wo Stoffwechselprozesse stattfinden, sind dieselben als chemische Reaktionen von Wärmetönungen begleitet. Dementsprechend ist sowohl an der Speicheldrüse wie an der Niere gefunden worden, daß das gebildete Sekret wärmer ist als das Blut, welches die Drüsen durchströmt. Es ist allerdings die Wärmebildung in der Speicheldrüse bestritten worden, jedoch ist aus chemischen Gründen an der Richtigkeit der älteren Angaben kaum zu zweifeln.

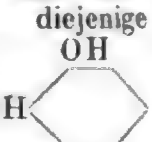
5c) Andere chemische Vorgänge. Welche Stoffe sich während der Drüsentätigkeit umsetzen, darüber sind unsere Kenntnisse noch gering. In bezug auf die Beteiligung der stickstoffhaltigen Körper lauten die Angaben nicht gleichlautend. Einerseits konnte gezeigt werden, daß bei Anregung der Tätigkeit der Verdauungsdrüsen keine Erhöhung der Stickstoffausscheidung im Harn eintritt, demnach keine vergrößerte Eiweißzersetzung die Drüsentätigkeit zu begleiten scheint. Andererseits liegen Anhaltspunkte dafür vor, daß erhöhte Drüsentätigkeit eine vermehrte Ausscheidung von Harnsäure bewirken kann. Letztere Tatsache besagt, daß ein gesteigerter Umsatz von solchen Stoffen stattgefunden hat, welche in ihrem Molekül den Purinkern

enthalten; von dieser Art Stoffen kämen in erster Linie die Nukleine in Betracht. Doch scheint der Umsatz der Nukleine so geringfügig zu sein, daß er erst bei einer über die Norm gesteigerten Tätigkeit in den Drüsenzellen in Betracht kommt.

Diesen Erfahrungen zufolge müssen stickstofffreie Körper diejenigen sein, welche bei der Drüsentätigkeit umgesetzt werden und die chemische Quelle für die Energieleistungen der Sekretion abgeben. In erster Linie kommt hierfür Zucker in Betracht. Die Beteiligung des Zuckers an den Tätigkeitsvorgängen in der Drüsenzelle ließ sich an der Speicheldrüse erweisen. Es nimmt nämlich während der Speichelabsonderung die Zuckermenge in dem die Drüse durchströmenden Blut zu, eine Erscheinung, welche sich dadurch erklärt, daß in der zur Tätigkeit geweckten Drüsenzelle aus einer Vorstufe Zucker frei wird. Derjenige Zucker nun, welcher der Verbrennung entgeht, tritt, da er leicht diffusibel ist, aus der Zelle in das Blut über. In der Ruhe hingegen findet Ersatz des Zuckers aus dem Blute statt.

Die Drüsenzelle kann, wie oben erwähnt wurde, der Sitz synthetischer Prozesse sein, indem in ihr Stoffe gebildet werden, welche im Blute nicht vorkommen. Ein Teil dieser Stoffe, vornehmlich die Enzyme, welche zur Absonderung gelangen, finden sich in der ruhenden Drüsenzelle schon vor, werden also nicht erst in der Periode der Tätigkeit gebildet. Dies wird dadurch erwiesen, daß sich die Enzyme aus einer ruhenden Drüse extrahieren lassen. Andererseits erschöpft sich im Verlaufe einer längeren Sekretionsperiode der Gehalt des Sekretes an Enzymen. Es ist allerdings nicht das fertige Enzym, sondern zumeist eine Vorstufe desselben, ein Zymogen, welches sich in der ruhenden Drüsenzelle vorfindet, beispielsweise in den Drüsenzellen des Magens das Pepsinogen, in denjenigen der Pankreasdrüse das Trypsinogen. Der Uebergang der Drüsenzelle aus dem ruhenden in den tätigen Zustand bedingt also nur den physikalisch-chemischen Prozeß der Umwandlung des Zymogens in das fertige Enzym, während der wesentlichere Prozeß der Bildung in die ruhende Zelle verlegt ist. Da die Konstitution der Enzyme unbekannt ist, läßt sich auch nichts über die chemische Entstehung der Enzyme aussagen.

Eine andere Gruppe von Stoffen, welche in Drüsenzellen gebildet werden, sind organische Körper bekannter Zusammensetzung. Daher läßt sich auch in vielen Fällen ihre Bildungsweise angeben. Die Nierenzelle bildet Hippursäure; dieselbe entsteht synthetisch aus Benzoesäure und Glykokoll. Denn, wenn man die Niere mit Blut durchströmt, welche beide Stoffe enthält, entsteht Hippursäure. Die Taurochol- und Glykocholsäure der Galle entstehen auf synthetischem Wege durch Zusammentreten von Cholsäure mit Taurin beziehentlich Glykokoll innerhalb der Leberzelle, welche demnach u. a. ein Ort ist, wo Eiweißabbauprodukte — Glykokoll ist eine in zahlreichen Eiweißkörpern enthaltene Aminosäure, Taurin (Amidoäthylsulfosäure) ist ein Abkömmling des Cystins, eines schwefelhaltigen Kernes im Eiweißmolekül — wieder zusammengefügt werden. Der spezifische Eiweißkörper der Milch, das Kasein, sowie das Milchfett sind synthetische Produkte der Milchdrüsenzelle; ebenso wird der fettartige Körper im Talg durch Synthese in der Talgdrüsenzelle gebildet. Was das Kasein anbetrifft, so scheint es in der Milchdrüsenzelle aus einer Paarung von Eiweiß und einem phosphorhaltigen, noch unbekannten Bestandteil der Zelle zu entstehen. Der Milchzucker ist gleichfalls ein synthetisches Produkt der Milchdrüsenzelle, welches aus Traubenzucker und Galaktose besteht. Galaktose kommt im Blute nicht vor, muß also in der Milchdrüsenzelle entstanden sein. Von den Drüsen mit innerer Sekretion kann die Nebenniere als Beispiel herangezogen werden, wo in der Drüsenzelle eine Neubildung stattfindet, nämlich diejenige des Adrenalins. Adrenalin



$.CH(OH)CH_2.NHCH_3$ wird in den Zellen der Nebenniere auf eine noch unbekannte Weise vermutlich aus Spaltungsprodukten des Eiweißes gebildet und an das Blut abgegeben, während es an anderen Orten, wo es seine Wirksamkeit entfaltet, zerstört wird.

Eine ganze Reihe der in den Drüsenzellen neu entstehenden organischen Körper wird stetig gebildet. Unzweifelhaft ist das der Fall in denjenigen Drüsen, bei denen auch eine stetige Sekretion stattfindet. Bei dieser Art Drüsen steigt auch mit der Vermehrung ihrer Absonderung die Menge der neugebildeten Substanzen, beispielsweise in den gallenbereitenden Leberzellen. Dies hängt damit zusammen, daß eben eine Bedingung der Mehrabsonderung der Zustrom von Stoffen ist, welche in der Leberzelle eine spezifische Verarbeitung erfahren. Andererseits kann die Neubildung der Stoffe auch, wie bei den Enzymen, in die Ruheperiode der Drüse verlegt sein, wie das beispielsweise in der Milchdrüse der Fall ist.

5d) Lymphbildung. Eine weitere Begleiterscheinung der Drüsentätigkeit ist die gesteigerte Lymphbildung innerhalb der Drüse, welche ihre Entstehungsursache nicht in den veränderten Kreislaufsbedingungen, sondern in der spezifischen Tätigkeit der Drüsenzelle hat. Der Nachweis hierfür konnte

an der Speicheldrüse, dem Pankreas und der Leber erbracht werden (vgl. den Artikel „Lymphe").

5e) Elektrische Veränderungen. An den Drüsenzellen können Unterschiede des elektrischen Potentials beobachtet werden, welche bei Ableitung in einen äußeren Bogen elektrische Drüsenströme ergeben. Beispielsweise lassen sich von der Zunge des Frosches Ströme ableiten, welche auf die dort befindlichen Drüsen zu beziehen sind. Wenn in den letzteren durch Pilocarpin gesteigerte Absonderung hervorgerufen wird, treten Schwankungen der „Ruheströme" ein, welche vollkommen denen analog sind, welche ganz allgemein an tätigen Gebilden im Organismus beobachtet werden.

5f) Morphologische Veränderungen in tätigen Drüsen. Bei weitem die auffallendsten Veränderungen, welche sich zwischen ruhenden und tätigen Drüsen beobachten lassen, sind morphologischer Art. Namentlich bei solchen Drüsen, bei welchen die Perioden der Ruhe und Absonderung in ausgeprägter Weise abwechseln, sind die Bilder ruhender und absondernder Drüsenzellen charakteristisch.

Möglichst unversehrte Drüsenzellen ohne Hinzutun irgendeines Reagens im natürlichen Zustande unter dem Mikroskop untersucht, erweisen sich als erfüllt mit zahlreichen Körnchen verschiedener Größe, welche so dicht liegen können, daß sie den größeren Teil des Protoplasmas auszumachen scheinen und dessen Strukturen größtenteils verdecken. Wird hingegen in genau der gleichen Weise eine Drüsenzelle im Stadium der Absonderung untersucht, so ist eine sehr große Abnahme der Körnchen zu konstatieren. Die Größe des Schwundes der Körnchen und die Intensität der Absonderung gehen Hand in Hand. Die histologische Technik hat Methoden ausgebildet, um die leicht vergänglichen Körnchen oder Granula an allen Orten, auch dort, wo die Drüsen der Beobachtung im möglichst natürlichen Zustande nicht zugänglich sind, zu untersuchen. Die spezifischen Granulafixierungs- und -färbungsmethoden haben nun an allen möglichen Drüsen übereinstimmend ergeben, daß mit dem Eintritt einer Sekretionsphase die in der nicht absondernden Drüse angehäuften Granula abzunehmen beginnen, daß im allgemeinen die Abnahme in der Richtung von der Basis der Drüsenzelle nach dem lumenwärts gelagerten Abschnitt der Zelle fortschreitet, daß bei sehr intensiver Absonderung ein fast vollständiger Schwund der Granula eintritt und daß dann erst in der Periode der Ruhe ein Wiederersatz der Granula sich vollzieht. Genau die gleichen Veränderungen werden beobachtet, wenn an passenden Objekten die vitale Färbung angewandt wird. Die Granula und ihre Wandlungen erweisen sich demnach nicht als Kunstprodukte, sondern als Dokumente des Geschehens innerhalb der absondernden Zelle.

Durch mikrochemische Reaktionen ergibt sich, daß mindestens ein Teil der Granula chemisch den Nukleoproteiden nahesteht. Andererseits lehrt die ganze Art und Weise, wie sich während und nach dem Sekretionsakt die Granula verhalten, daß ihre Substanzen zur Sekretbildung verwertet werden. Zum Teil sind die Granula identisch mit den Profermenten, welche infolge des Antriebes zur Sekretion in die Fermente umgewandelt und aus der Zelle entfernt werden. Daher die Erschöpfung nach intensiver Absonderung, nach welcher erst in der Ruheperiode eine Neubildung der Profermente stattfinden kann. In den Schleimdrüsen sind die Granula die Vorstufen des im Sekrete in mehr flüssiger Form austretenden Schleimes. Nun kommen aber in Drüsen mit rein wässeriger Sekretion, wie z. B. die Tränendrüsen und die Nickhautdrüsen des Frosches, genau die gleichen Granula und deren Wandlungen vor. Diese Granula können dem Charakter des Sekretes nach keine Enzyme sein und keine organischen Sekretprodukte, vielmehr müssen es organische Stoffe sein, welche sich zwar während des Sekretionsaktes physikalisch-chemisch umwandeln, aber nicht nach außen abgegeben werden. Aus der Gesamtheit dieser Tatsachen hat man den Schluß gezogen, daß die Granula in besonders nahem Zusammenhang mit den chemischen Prozessen ständen, welche als die Grundlagen des Auslese- und Scheidevermögens der Drüsen anzusehen sind.

Außer den Aenderungen, welche an den Granulis eintreten, lassen sich noch Veränderung in den Größenverhältnissen und im feineren Aufbau der Zelle, insbesondere des Protoplasmas beobachten, wozu die in der histologischen Technik allgemein üblichen Methoden ausreichend sind. Es handelt sich meist darum, daß infolge der Absonderungstätigkeit die Drüsenzellen im ganzen kleiner werden und das Protoplasma andere färberische Eigenschaften zeigt. Soweit geht der Zusammenhang zwischen strukturellem Aufbau und Funktionszustand, daß selbst die Erregung der Absonderung auf verschiedenem Wege, z. B. die Erregung der Pankreasdrüse durch Sekretin, durch Vagus- und durch Sympathicusreizung, in einem verschiedenen Aussehen der Zellen im histologischen Bilde sich kund tut, was zweifelsohne damit im Zusammenhange steht, daß die Art der Absonderung bei den drei Reizen nicht die gleiche ist.

6. Die Zusammensetzung der Sekrete. In der Zusammensetzung der Sekrete offenbaren sich am deutlichsten die Leistungen der Drüsenzelle. Die Untersuchung hat sich hierbei auf die physikalisch-chemische und die chemische Beschaffenheit der Sekrete zu richten. Ihre eigentliche Bedeutung erlangen die gewonnenen Daten durch den Vergleich mit der Zusammensetzung des Blutes beziehentlich der Gewebsflüssigkeit, aus welcher in letzter Linie das Material stammt, welches entweder in unveränderter oder verarbeiteter Form die Drüse im Sekret verläßt.

Was zunächst die molekulare Konzentration der Sekrete, welche sich mit Hilfe der Gefrierpunktserniedrigung bestimmen läßt, anbetrifft, so kann sie dieselbe sein, wie diejenige des Blutes. In diesem Fall haben das Sekret und das Blut den gleichen osmotischen Druck, welcher ja von der durch die Gefrierpunktserniedrigung gefundenen Anzahl von nichtdissoziierten Molekülen und dissoziierten Ionen abhängt, und man bezeichnet beide Flüssigkeiten als miteinander isotonisch. Es können aber die Sekrete verglichen mit dem Blute sowohl hypertonisch wie hypotonisch sein, d. h. eine größere Gefrierpunktserniedrigung und demgemäß einen größeren osmotischen Druck, beziehentlich eine geringere Gefrierpunktserniedrigung und einen geringeren osmotischen Druck besitzen.

Zu den mit dem Blute isotonischen Sekreten von Säugetieren gehören die Galle, die Milch und der Pankreassaft, doch können bei allen diesen Sekreten Abweichungen von der Isotonie vorkommen. Hypotonisch gegenüber dem Blute sind der Speichel, der Magensaft und der Schweiß, während der Darmsaft, die Augenflüssigkeiten und der Harn hypertonisch sein können. Unter bestimmten Bedingungen können Sekrete, welche sonst hypertonisch sind, auch in einem hypotonischen Zustande abgesondert werden.

Die Unterschiede in der „Osmotizität" zwischen Blut und Sekreten ist eine Erscheinung, welche sich erst bei den höheren Tieren ausgebildet hat. Bei den wirbellosen Seetieren sind sowohl die Körperflüssigkeiten untereinander isosmotisch, wie sie auch isosmotisch mit dem Meerwasser sind, in welchem die Tiere leben und machen die etwaigen Schwankungen der osmotischen Konzentration des Meerwassers mit. Diese Tatsache ist vom vergleichend biologischen Standpunkt von erheblichem Interesse. Denn sie weist auf einen bedeutsamen Unterschied in den Eigenschaften der Drüsenzellen hin, indem die Drüsenzellen der höheren Tiere durch solche osmotische Konzentrationen, wie sie bei den Seetieren vorkommen, entweder zur Sekretion veranlaßt werden oder, wenn sie durch anderweitige Reize zur Absonderung veranlaßt werden, dies in anderer Weise als bei der für sie normalen osmotischen Konzentration tun.

An dem Werte der osmotischen Konzentration der Sekrete haben bei weitem den überwiegenden Anteil die unorganischen Bestandteile, während diejenige der organischen Stoffe zurücktritt. Nur beim Harn können organische Stoffe, z. B. der Harnstoff, einen nicht zu vernachlässigenden Betrag der osmotischen Konzentration ausmachen. Elektrolyte und Nichtelektrolyte sind in den Sekreten die Erzeuger der osmotischen Konzentration. Der Gehalt an Elektrolyten läßt sich durch Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Sekrete beurteilen; je größer die Leitfähigkeit beziehentlich je kleiner der in Ohm ausdrückbare elektrische Widerstand ist, um so größer ist die Konzentration an Elektrolyten. Genauere Bestimmungen existieren bis jetzt nur von zwei Sekreten, dem Harn und der Milch. Der erstere besitzt meist eine größere, die letztere meist eine geringere Konzentration an Elektrolyten.

Die Kenntnis der osmotischen Konzentration der Sekrete hat dadurch noch eine besondere Bedeutung gewonnen, daß man aus derselben die „osmotische Arbeit" berechnen kann, welcher zur Bildung eines Sekretes benötigt wird. Am klarsten liegt die Sache bei hypertonischen Sekreten gegenüber dem Blutplasma. Denn offenbar muß eine Arbeit geleistet werden, um aus einer Flüssigkeit von dem niedrigeren osmotischen Druck des Blutes eine solche mit dem höheren osmotischen Druck des Sekretes zu machen. Die großen hier möglichen Unterschiede erhellen am besten aus dem Beispiele des Harnes. Der Gefrierpunktserniedrigung von $-0{,}56^0$ des Blutes entspricht ein osmotischer Druck von etwa 7 Atmosphären, während eine Gefrierpunktserniedrigung des Harnes von $-2{,}3^0$ einem osmotischen Druck von etwa $27^1/_2$ Atmosphären entspricht. Die anzustellende Ueberlegung ist nun dieselbe, als ob man ein Gas von einem bestimmten Volum so stark komprimieren müsse, bis es auf ein kleineres Volum mit dem entsprechenden höheren Druck angelangt sei. Diese Ueberlegung führt zu einer Formel, welche die zu leistende Arbeit ausdrückt durch $A = RT \log nat \frac{v_1}{v_2}$ beziehentlich, da sich die Volumina umgekehrt wie die Drucke, bei Flüssigkeiten also auch umgekehrt wie die mit dem osmotischen Drucke proportionalen Gefrierpunktserniedrigungen verhalten, $A = RT \log nat \frac{\Delta_2^0}{\Delta_1^0}$, wo R die Gaskonstante, T die absolute Tempe-

ratur, Δ_2^0 der Gefrierpunkt des Harnes, Δ_1^0 der Gefrierpunkt des Blutes sind.

Diese Formel gibt nur das Prinzip der Berechnung wieder und bedarf der Korrekturen, um sie den speziellen Fällen anzupassen. Beispielsweise wurde mit Hilfe dieser Formel berechnet, daß die Niere eine Arbeit von 37,037 kgm leistet, wenn sie 200 ccm Harn mit einem Gefrierpunkt — 2,3° absondert. Aber auch wenn das Sekret dem Blutplasma gegenüber hypotonisch ist, bedarf es zur Aufrechterhaltung dieses Unterschiedes der osmotischen Arbeit; denn es muß entgegen der Wirkung des osmotischen Druckes Wasser aus der konzentrierteren Blutflüssigkeit in das verdünntere Sekret gepreßt werden. Auch bei diesem Sachverhalt kommt man zu sehr erheblichen Arbeitswerten, welche von der Drüsenzelle geleistet werden müssen. Es könnte den Anschein erwecken, als ob bei Isotonie zwischen Blutflüssigkeit und Sekret eine osmotische Arbeit nicht anzunehmen sei. Es zeigt sich jedoch, daß selbst bei Isotonie die partiellen Konzentrationen der Sekretbestandteile und des Blutplasmas voneinander verschieden sind. Da nun in Wirklichkeit die Berechnung der osmotischen Arbeit jedesmal, also auch bei hyper- und hypotonischen Sekreten, auf Grund der partiellen Konzentrationen durchgeführt werden muß, so ergibt sich auch bei Isotonie und verschiedener Konzentration der einzelnen Bestandteile des Sekretes und des Blutes die Notwendigkeit, osmotische Arbeit zur Herstellung dieser Unterschiede zugrunde zu legen. Die bis jetzt berechneten Werte der osmotischen Arbeit (bei der Niere) stellen, wie schon gesagt, nicht die vollen Werte dar, da sich die Rechnung auf Voraussetzungen idealisierender Art, die im Organismus nicht zutreffen, stützt, u. a. darauf, daß die Arbeit isotherm geleistet wird. Um so mehr, weil die Werte zu klein sind, lehren die Ergebnisse, wie groß die Arbeit ist, welche bei der Bildung von Sekreten zu leisten ist, und es schließt sich der Nachweis von osmotischer Arbeit den anderen Zeugnissen an, welche für die Energieumwandlungen während der Sekretion beigebracht wurden. Es ist nicht uninteressant, einen Vergleich zwischen der chemischen und der osmotischen Arbeit anzustellen. Der Vergleich ergibt, daß die Berechnung der chemischen Arbeit höhere Werte liefert, was ja in Uebereinstimmung mit dem vorausgehenden steht.

In ihrer chemischen Zusammensetzung sind die Sekrete weitgehend voneinander verschieden. Wie schon oben berichtet wurde, enthielten viele derselben besondere, in der Drüsenzelle gebildete Stoffe und zwar ist das immer dann der Fall, wenn das Sekret eben durch diese Stoffe eine besondere Funktion leisten soll, wie ein Verdauungssaft, der durch seine Enzyme die Nahrung spalten, die Milch, welche durch ihren Gehalt an Eiweiß, Fett und Milch nähren, das Talgdrüsensekret, welches durch seinen Talggehalt die Haut einfetten soll. Wenn man von dem Gehalt der Sekrete an spezifischen Stoffen absieht und nur diejenigen Stoffe berücksichtigt, welche auch im Blute vorkommen, so lehrt der Vergleich das Auslesevermögen der einzelnen Drüsen für die Bestandteile des Blutes kennen. Das wird z. B. sehr deutlich illustriert durch eine Gegenüberstellung der Zusammensetzung des Harnes und des Blutes.

	Proz. im Harn	Proz. im Blut
Eiweiß	0	8
Traubenzucker	Spuren	0,15
Harnstoff	2	0,05
Kalium	0,16	0,03
Natrium	0,18	0,34
Chlor	0,22	0,35
Schwefelsäure	0,27	0,01

Diese Uebersicht zeigt, daß gewisse im Blut vorhandene Stoffe entweder gar nicht oder nur in sehr geringfügigen Mengen von der Nierenzelle ausgelesen werden, andere hingegen in solchen Mengen, daß das Sekret sehr viel konzentrierter an diesen Bestandteilen ist als die Blutflüssigkeit, aus welcher das Sekret stammt. Nicht weniger instruktiv ist der Vergleich zwischen der Zusammensetzung der Milch und der des Blutes hinsichtlich der Aschenbestandteile. Der Kalk- und Phosphorsäuregehalt der Milch ist um ein sehr vielfaches größer als der des Blutplasmas; es beträgt z. B. der Kalkgehalt in 100 Gewichtsteilen Asche der Kaninchenmilch 35,7, hingegen des Blutes nur 1,4, der Phosphorsäuregehalt der Kaninchenmilch 39,9, der des Blutplasmas 3,0. Der biologische Sinn dieses großen Unterschiedes zwischen Milch und Blutplasma hat eine überraschende Aufklärung durch die Analyse der Asche des Säuglings erhalten. Es ergab sich, daß die Milchasche und die Asche des Säuglings sehr nahe die gleiche Zusammensetzung besitzen. Gestützt auf diese Tatsache konnte der Satz ausgesprochen werden, daß die Zellen der Milchdrüse aus dem Blutplasma der Mutter die Aschenbestandteile ziemlich genau in den Gewichtsverhältnissen auslesen, welche zum Aufbau des jungen Tieres notwendig sind. Auch andere Fälle von Unterschieden in der Zusammensetzung zwischen Sekret und Blut sind, was ihre biologische Bedeutung anbetrifft, durchaus verständlich. Der Harn ist konzentrierter als das Blut, weil hierin ein wirksames Mittel gegeben ist, den Organismus von überflüssigen Molekülen zu befreien und so die osmotische Konzentration namentlich

des Blutes konstant zu halten. Im Speichel, in den Tränen und im Schweiße scheiden die Drüsenzellen eine an Wasser sehr reiche, an Mineralbestandteilen des Blutes, soweit sie im Sekret vorkommen, sehr viel verdünntere Flüssigkeit, als das Blut ist, aus. Offenbar steht dies mit ihrer Funktion im Zusammenhange, die zum großen Teile in einer mechanischen Spülwirkung wie beim Speichel und den Tränen, in einer physikalischen Wärmeregulation wie beim Schweiße besteht, wozu nur Flüssigkeit nötig ist, ohne daß Ausscheidung von Salzen des Blutes hierzu erforderlich wäre.

Die Konzentration, in der einzelne Bestandteile des Blutes in den Sekreten ausgeschieden werden, ist nichts absolut fixiertes, sondern variiert. Diese Variation ist von einer Reihe von Bedingungen abhängig. Wir sahen, daß die Niere jede Veränderung der Blutzusammensetzung mit vermehrter Absonderung beantwortet und diejenigen Stoffe, welche im Blute vermehrt sind, werden, wenn sie überhaupt die Nierenzelle passieren können, vermehrt ausgeschieden. Dabei folgt diese Mehrausscheidung besonderen Regeln, aus denen wiederum das spezifische Auslesevermögen der Nierenzellen hervorgeht. So genügt es beispielsweise, den Kaliumchloridgehalt des Blutes dauernd nur um 0,1% (von 0,02 auf 0,03) zu erhöhen, um einen Harn zu erhalten, dessen Prozentgehalt an Kalium zwanzigmal höher ist als der des Blutes. Bei anderen Drüsen, deren Absonderung nur auf einen gegebenen Reiz hin eintritt, läßt sich zeigen, daß mit wachsender Absonderungsgeschwindigkeit nicht allein die Menge Wasser, sondern auch der Gehalt an Salzen steigt, und zwar nicht allein absolut, sondern, was auffallender ist, auch prozentual. Diese Regel läßt sich sehr leicht an der Speicheldrüse nachweisen, an welcher Verstärkung der Reize, vorausgesetzt, daß diese zu vermehrter Speichelabsonderung führt, auch eine Erhöhung des Prozentgehaltes an Kochsalz bewirkt. Diese Erhöhung der Salzausfuhr hat seine Grenzen; nie geht sie über eine gewisse Menge hinaus und erreicht auch in keinem der Sekrete, bei denen die analoge Erscheinung zu beobachten ist, den Kochsalzgehalt des Blutes, außer bei der Niere. Wie eng begrenzt der Umfang ist, innerhalb dessen die Konzentration der Sekrete schwanken kann, geht am klarsten aus den Ergebnissen hervor, welche erhalten werden, wenn künstlich die Konzentration des Blutes an Stoffen, welche durch die Drüsen ausgeschieden werden, erhöht wird. Tatsächlich wird z. B. durch den Speichel, wenn man den Kochsalzgehalt des Blutes durch intravenöse Injektion von Kochsalz erhöht, mehr Kochsalz ausgeschieden. Aber sehr viel darf die Erhöhung nicht betragen, denn sowie der Chlorgehalt des Blutes knapp sich verdoppelt hat, stellt die Speicheldrüse überhaupt ihre Tätigkeit ein. Einige andere Stoffe, wie die Phosphate und Sulfate, welche von der Speicheldrüse in kleinsten Mengen ausgeschieden werden, werden trotz Anreicherung derselben im Blute durchaus nicht vermehrt ausgeschieden. Wiederum anders verhält es sich mit einzelnen Stoffen, welche unter normalen Verhältnissen überhaupt nicht ausgeschieden werden.

Was den Zucker anbetrifft, welcher im Blute stets in annähernd konstanter Menge von 0,1 bis 0,15% vorkommt, so wird er z. B. weder von der Niere, noch von der Speicheldrüse ausgeschieden. Sowie aber die Konzentration des Zuckers im Blute künstlich vermehrt wird, tritt er auch im Harn auf; im Speichel aber erscheint der Zucker auch dann nicht, wenn er im Blute sehr hohe Werte erreicht hat. Harnstoff wird leicht von der Niere ausgeschieden, von der Speicheldrüse in der Norm nicht. Wenn jedoch die Nierentätigkeit daniederliegt, tritt im Speichel Harnstoff aus. Eigentümlich sind auch die Verhältnisse des Eiweißes. In den meisten Sekreten finden sich sehr kleine Mengen von Eiweiß, geradezu verschwindend in den Tränen und im Schweiß, etwas mehr in den Verdauungsdrüsen, doch nur im Pankreassafte so viel betragend, daß der Saft in der Hitze Gerinnung zeigt, und schließlich im Harn keines. Ob die Spuren von Eiweiß, welche in einzelnen Sekreten vorkommen, überhaupt aus dem Blute stammen, ist fraglich; größtenteils sind es, wie die Eiweißkörper der Milch, in den Drüsenzellen gebildete Eiweißkörper, so daß von einer eigentlichen sekretorischen Auslese nicht die Rede sein kann. Auch bei den verschiedensten experimentellen Beeinflussungen bleiben die Ausscheidungsverhältnisse des Eiweißes die gleichen. Nur in der Niere findet sehr leicht durch Abweichungen von der Norm eine sonst nicht vorhandene Ausscheidung von Bluteiweißkörpern statt. Es genügt eine Minute Absperrung des Blutkreislaufes, um die Niere durchlässig für Eiweiß zu machen. Den mannigfachen Unterschieden zwischen Nierenzellen und anderen Drüsenzellen läßt sich noch ein weiteres Beispiel zufügen. Wenn durch Stauung in den Gallenwegen Gallenbestandteile in das Blut gelangen, finden sich dieselben im Harn, wie auch in einer Reihe von Transsudaten und Exsudaten, nicht jedoch im Speichel, hingegen im Schweiße.

Insgesamt bieten die Verhältnisse der Ausscheidung von im Blute vorkommenden Stoffen durch die einzelne Drüse eine derartige Fülle von Verschiedenheiten, daß eine vollständige Regellosigkeit zu bestehen scheint.

Man erhält aber, wenn man von einem biologischen Standpunkte die Verschiedenheiten betrachtet, eine gewisse Aufklärung, nicht gerade über den Mechanismus der Absonderung, wohl aber über die biologische Bedeutung mancher Verschiedenheiten. Die Nichtabgabe von Eiweiß und Zucker durch die meisten Sekrete liegt im Interesse der Erhaltung wertvollen Nährmateriales. Der geringe Salzgehalt vieler Verdauungssekrete ist nützlich, weil manche Fermente durch stärkere Salzkonzentrationen geschädigt werden. In der abnormen Ausscheidung von z. B. Harnstoff durch den Speichel können wir eine vermehrte Abhilfe gegen das Versagen der Niere, eine sogenannte Selbstregulation, erblicken.

Schließlich ist hinsichtlich der chemischen Reaktion der Sekrete zu berichten, daß sie durchaus nicht alle die neutrale Reaktion des Blutplasmas besitzen. In erster Linie gibt es einzelne Sekrete, welche sauer reagieren, z. B. den Harn, den Magensaft und den Speichel der Schneckenart Dolium galea. Die beiden letztgenannten Beispiele sind insofern besonders bemerkenswert, als hier das Vorhandensein von freien starken Mineralsäuren nämlich von Salzsäure beziehentlich Schwefelsäure nachgewiesen worden ist. Auch alkalische Reaktion von Sekreten kommt vor z. B. bei dem Sekret des Pankreas. Etwas näher sind wir über die Bedingungen, unter welchen Salzsäure im Magensaft zur Ausscheidung gelangt, informiert. Erstens entsteht die Salzsäure in speziellen Zellen der Magenschleimhaut, nämlich den sogenannten Belegzellen, denn nur in dem Teil des Magens, wo diese Art Zellen vorhanden ist, wird Salzsäure abgesondert, und nur in diesen Zellen gelingt mit Hilfe von mikrochemischen Salzsäurereaktionen (Bildung von Berlinerblau) deren Nachweis. Zweitens findet sich die freie Salzsäure nicht in der Tiefe, sondern nur auf der Oberfläche der Magenschleimhaut, in den Ausführungsgängen der Magendrüsen und in feinen intrazellulären Gängen der säurebildenden Belegzellen. Drittens bilden die letztgenannten Zellen HBr und nicht HCl, wenn dem Organismus Brom anstatt Chlor gereicht wird und bei bloßem Chlorentzug hört die Bildung von Salzsäure auf. Die Bildung der freien Schwefelsäure ist noch ganz unaufgeklärt. Was die saure Reaktion des Harnes anbetrifft, so beruht sie nicht auf dem Vorhandensein einer freien Mineralsäure, sondern auf dem eines Ueberschusses freier H-Ionen, herrührend von der Dissoziation schwacher Säuren wie Phosphorsäure, Harnsäure u. a. Da das Blut seine neutrale Reaktion mit großer Festigkeit konstant erhält, auf Grund eines chemischen Gleichgewichtes, an dem wesentlich die Phosphate, Karbonate und die Eiweißkörper des Blutes beteiligt sind, muß zur Erzeugung einer sauren Reaktion auf den Wegen der Sekretbildung eine Verschiebung des chemischen Gleichgewichtes durch einen Ausleseprozeß stattgefunden haben, der mit Energieverbrauch verknüpft sein dürfte. Dieselben Ueberlegungen gelten übrigens für die Entstehung des alkalischen Pankreassaftes.

7. Theorie der Sekretion. Die vorstehend entwickelten Tatsachen enthalten für eine Theorie der Sekretion den unzweifelhaften Nachweis, daß Energieverbrauch beim Sekretionsakt stattfindet. Zeugnis dafür legten die Wärmebildung, die chemische und osmotische Arbeit und die morphologischen Umwandlungen ab. Sowie diese Grundlage gesichert ist, erhellt daraus die Unmöglichkeit, die Sekretion rein mechanisch durch Filtration oder Diffusion zu erklären. Was speziell die Filtration anbetrifft, so läßt sich diese durch das Experiment direkt ausschließen. An der Speicheldrüse konnte gezeigt werden, daß der Druck, unter welchem die Speichelabsonderung stattfinden kann, den arteriellen Blutdruck weit übertrifft; denn wenn man den Ausführungsgang der Speicheldrüse mit einem Steigrohr verbindet, welches zu einer größeren Höhe mit Flüssigkeit aufgefüllt ist, als der Höhe des Blutdruckes entspricht, wird bei Reizung des Nerven der Speicheldrüse durch das Sekret die Flüssigkeit noch höher gehoben, also mit Ueberwindung dieses Druckes ausgepreßt.

Es konnte ferner gezeigt werden, daß der Schweiß unter einem höheren Druck als der Kapillardruck, die Galle unter einem höheren Druck als der Pfortaderdruck abgesondert werden. Offenbar müssen in Drüsen, in welchen so hohe Druckkräfte zur Ausbildung gelangen, Vorrichtungen vorhanden sein, um die Blutkapillaren und die Räume der Gewebsflüssigkeit von der Absperrung zu schützen. Eine solche Vorrichtung ließ sich gerade in der Speicheldrüse nachweisen, indem dort die spezifischen Zellen auf einer äußerst widerstandsfähigen Membrana propria aufsitzen, welche den Druck zu tragen vermag.

Der Mechanismus, durch welchen die hohen Druckkräfte entwickelt werden, hat sich noch nicht feststellen lassen. Es war naheliegend an kontraktile Kräfte im Protoplasma der Drüsenzelle zu denken, ohne daß sich bis jetzt für diese durchaus plausible Annahme experimentelle Anhaltspunkte haben gewinnen lassen. Da auch durch Quellungsvorgänge erhebliche Druckkräfte gewonnen werden, hat man auch an solche zu denken. Die Bedingungen zur Entstehung von Quellungsvorgängen sind in dem kollo-

iden Eiweißsubstrat der Drüsenzelle gegeben, namentlich dann, wenn im Augenblicke der Erregung etwa eine Säure, wie z. B. Milchsäure, frei werden sollte.

Diffusion spielt bei der Sekretion keine Rolle, denn während Diffusion dahin tendiert, Gleichheit der Zusammensetzung herbeizuführen, ist es ja gerade ein Merkmal der Sekrete, von der Blutflüssigkeit in ihrer Zusammensetzung abzuweichen. Auch Osmose scheidet aus, da ja nicht selten die Sekretbildung in der der osmotischen Druckkraft entgegengesetzten Richtung vor sich geht. Es gibt aber Erscheinungen, welche sich an unbelebtem Material beobachten lassen und welche eine überraschende Analogie mit derjenigen besitzen, welche charakteristisch für die Drüsentätigkeit ist, nämlich dem spezifischen Auslesevermögen. Werden z. B. Leimplatten in eine 0,00125 prozentige Methylviolettlösung gebracht, so können dieselben so viel Farbstoff aufnehmen, daß die Konzentration in der Leimplatte, bezogen auf die ursprüngliche Farbstofflösung, 36,7 beträgt. Derartige Beispiele von „physikalischer Sekretion" durch kolloides Material lassen sich in nicht geringer Anzahl auffinden. Sie stellen überdies einen Spezialfall eines Prinzipes von sehr allgemeiner Bedeutung dar, nämlich des Verteilungssatzes. Der Verteilungssatz besagt, daß, wenn einem Stoff zwei Lösungsmittel geboten werden, derselbe sich derart in beiden Stoffen verteilt, daß das Verhältnis der Konzentration des Stoffes in beiden Stoffen ein konstanter ist, indem sich die Konzentrationen verhalten wie die Löslichkeiten des Stoffes in den beiden Lösungsmitteln. Wenn demzufolge die Löslichkeit in dem einen Lösungsmittel sehr groß, in dem anderen verschwindend klein wäre, so ist der Endeffekt der, daß das erste Lösungsmittel geradezu fast alles aus dem anderen ausliest. Um diese Verhältnisse auf den Sekretionsvorgang übertragen zu können, ist es nötig, das Wasser des Blutplasmas als das eine, das Protoplasma der Drüsenzelle als das andere Lösungsmittel aufzufassen, wobei das Protoplasma die gleiche Rolle wie die Leimplatte in der Farblösung spielen würde. Um allerdings den Vergleich so durchführen zu können, daß er dem von Drüse zu Drüse wechselnden Auslesevermögen für die Blutbestandteile gerecht wird, muß noch die weitere Annahme gemacht werden, daß die Kolloide der einzelnen Drüsenzelle ein für sie spezifisches Lösungsvermögen besitzen. Da man bisher die zellspezifischen Eiweißkörper weder rein noch in ihrer natürlichen Beschaffenheit auf ihre diesbezüglichen physikalisch-chemischen Eigenschaften hat untersuchen können, ist diese Seite des Problems überhaupt noch nicht in Angriff genommen worden. Der Hauptwert des Verteilungssatzes für die Lehre von der Sekretion liegt darin, daß er die Möglichkeit eröffnet, das Auslesevermögen durch nicht vitale Kräfte zu veranschaulichen. Die gleiche Möglichkeit gewährt ein anderer physikalisch-chemischer Vorgang, nämlich die Adsorption (vgl. den Artikel „Adsorption"). Die Analogie zwischen Adsorption und Auslesevermögen besteht darin, daß erstens beide Vorgänge durch Materialien mit sehr großer Oberflächenentwickelung bewerkstelligt werden, zweitens, daß bei wachsender Konzentration sehr rasch ein bestimmter Grenzwert des Aufgenommenen erreicht wird, welcher mit weiter steigender Konzentration sich nicht mehr ändert und daß drittens die beiden beteiligten Medien am Ende ganz verschiedene Konzentration haben.

Der Verteilungssatz über auswählende Lösungsfähigkeit für undissoziierte Stoffe und Ionen und Adsorption läßt sich aber nur als Erklärungsmöglichkeiten einer Seite des Sekretionsproblems heranziehen. Eine tiefergehende Analyse der Sekretion lehrt nämlich, daß mindestens zwei Akte dabei zu unterscheiden sind, erstens die Auslese und zweitens die Ausscheidung. Verteilungssatz oder Adsorption können günstigen Falles nur Grundlagen des erstgenannten Prozesses sein, der Auslese, welche übrigens ein allen Zellen, nicht bloß den Drüsenzellen, zukommendes Speicherungsvermögen ist. Das Scheidevermögen ist ganz anderer Art und das wesentlichere beim Sekretionsvorgang. Recht klar kann der Unterschied beider Prozesse an dem typischen Verhalten des Zuckers in der Speicheldrüse erkannt werden. Die oben beschriebene Nichtausscheidung des Zuckers im Speichel wurde früher einfach auf eine Nichtpermeabilität der Speicheldrüsenzelle für Zucker zurückgeführt. Zucker kann aber sehr wohl in die Speicheldrüsenzellen eintreten und aus denselben heraustreten, wie oben bei den chemischen Vorgängen in der Drüsenzelle dargelegt wurde. Was demnach fehlt, ist das Scheidevermögen im engeren Sinne des Wortes; die Speicheldrüsenzelle ist nicht imstande den in ihr befindlichen Zucker in der Richtung nach dem Sekretlumen abzuschieben. Genau das gleiche hat sich bei abnormer Zuckerdichtigkeit der Niere herausgestellt, wobei in der Nierenzelle wohl mehr Zucker als sonst vorhanden ist, er trotzdem aber nicht ausgeschieden wird. Die Bevorzugung einer bestimmten Richtung zeichnet das Scheidevermögen vornehmlich aus, so daß man geradezu von einer Polarität der Drüsenzelle sprechen kann. Sie ist natürlich nicht für alle Stoffe vorhanden, z. B. nicht für eine Reihe von körperfremden Stoffen, welche durch Drüsen ausgeschieden werden, aber

auch durch Injektion in einen Drüsengang dem Organismus einverleibt werden können. Es gibt andererseits Beispiele, an denen die Polarität und ihre biologische Bedeutung klar zutage tritt. In der Norm finden sich die spezifischen Produkte der Galle, die Gallensäuren, niemals im Blut, also steht denselben nur der Weg in die Gallenkapillaren offen. Da die Gallensäuren ein heftiges Gift für das Herz und das Zentralnervensystem sind, ist die Polarität der Leberzellen für dieselben ein ausgezeichnetes Schutzmittel. Anders verhält es sich mit den Enzymen der Verdauungsdrüsen, welche in kleinen Mengen im Blute aufgefunden werden können. Ihr Uebertritt ist biologisch unschädlich, weil im Blute die erforderlichen Antifermente vorhanden sind.

Die Permeabilität der Drüsenzelle, welche also von dem Scheidevermögen zu trennen ist, ist selbst nichts Fixiertes, sondern sie ist verschieden, je nachdem die Zelle ruhend oder erregt ist. Demnach haben wir eine statische und eine dynamische Permeabilität zu unterscheiden. Der Unterschied ist am schärfsten bei denjenigen Drüsen ausgeprägt, welche nur zeitweilig auf einen Reiz hin absondern.

In der Ruhe ist die Permeabilität dieser Zellen so außerordentlich gering, daß eine Aenderung des die Drüse durchströmenden Blutes nicht nachzuweisen ist; sowie aber die Drüse in lebhafter Absonderung sich befindet, genügt ein Zeitraum von 1 bis 2 Minuten, um eine sehr merkliche Aenderung in der Zusammensetzung des Blutes hervorzurufen, die an der Speicheldrüse durch Konzentrationszunahme des Blutplasmas um 2% infolge Wasseraustrittes nachweisbar ist. Die Umwandlung der statischen in die dynamische Permeabilität ist eine Folge der durch den Reiz gesetzten Erregung der Drüsenzelle. Der Zusammensetzung der meisten Sekrete entsprechend betrifft die Erhöhung der Permeabilität wesentlich das Wasser und eine Reihe von kristallinischen Stoffen. Allerdings nicht gleichmäßig, denn die Absonderung von Wasser und von Salzen geht nicht überall Hand in Hand. Die Permeabilität tierischer Zellen ist einer weitverbreiteten Theorie nach mit ihrem Gehalt an Lipoiden in einer hypothetischen Grenzschicht zusammengebracht worden. Für die als Faktor bei der Drüsensekretion beteiligte Permeabilität versagt diese Theorie völlig. Dies geht schon daraus hervor, daß bei einer Mehrzahl von Drüsen die wesentlichen Sekretbestandteile zu den nicht oder schlecht lipoidlöslichen Stoffen gehören. Sodann werden außer bei der Niere durch lipoidlösliche Gifte die Sekretionsvorgänge nicht beeinflußt. Schließlich läßt sich gerade an den Drüsenzellen zeigen, daß eine der Erscheinungen, welche zu den Hauptstützen für die Annahme einer Lipoidschicht gehört, gar nicht als Stütze gelten kann. Dies ist die vitale Färbbarkeit der Drüsenzellen, welche durch die gute Lipoidlöslichkeit der vitalen Farbstoffe sich erklären sollte. Nun lassen sich z. B. die Nickhautdrüsen des Frosches gut vital färben und dauernd am unversehrten Tiere beobachten; dabei zeigt sich, daß die Intensität der vitalen Färbung stark zunimmt, wenn die Nickhautdrüsen durch Pilocarpin zu intensiver Absonderung angeregt worden sind, stark abnimmt, wenn durch Atropin die Sekretion aufgehoben worden ist. Da nun die Größe der Permeabilität der Drüsenzelle gegenüber den lipoidlöslichen Farbstoffen durch dieselben Bedingungen zu und abnimmt wie gegenüber den lipoidunlöslichen Salzen und Wassern, kann das Verhalten der hypothetischen Lipoidschicht für die Permeabilität der Drüsenzellen nicht maßgebend sein.

Es gibt einen anderen physikalisch-chemischen Faktor, welcher Einfluß auf die Permeabilität und gleichzeitig auf das Scheidevermögen der Drüsenzelle haben könnte; das ist die Oberflächenspannung. Daß an den einzelnen Grenzschichten der Drüsenzelle eine verschiedene Oberflächenspannung herrscht, wird durch mikrochemische Reaktionen nachgewiesen. So konnte an den Drüsenzellen des Pankreas, der Speicheldrüse und der Brunnerschen Drüsen der Darmschleimhaut eine starke Kondensation von Kalium in der dem Lumen zugewandten Grenzschicht festgestellt werden, und zwar nur im Zustande der Tätigkeit dieser Drüsen. In den Tubulizellen der Nieren findet sich Kondensation von Kalium an derjenigen Grenzschicht, welche an die Gewebsflüssigkeit grenzt und an der lumenwärts gelegenen. Nun besagt der Unterschied in der Anhäufung von Kalium an den verschiedenen Grenzflächen der Zelle, daß an denselben eine verschiedene Oberflächenspannung herrscht. Denn nach einem Theorem von Gibbs und Thompson sammeln sich Stoffe in größerer Konzentration in der Oberfläche als im Innern einer Flüssigkeit an, wenn dadurch die Oberflächenspannung erniedrigt wird, hingegen befinden sie sich dort in geringerer Konzentration, wenn sie die Oberflächenspannung erhöhen würden. Die verschiedene Verteilung hat den Sinn, einen Ausgleich der Energieunterschiede in der Flüssigkeit zu bewirken. Es ist klar, daß die Unterschiede in der Oberflächenspannung an den Grenzschichten der Drüsenzelle, welche die mikrochemische Untersuchung aufdeckt, wohl imstande sein mögen, eine Bewegung gelöster Teile im Dienste der Absonderung zu fördern, und zwar sowohl mit Rücksicht auf die Auslese

aus dem Blute wie auf die Ausscheidung nach dem Lumen der Ausführungsgänge zu. Die Heranziehung der Oberflächenspannung als Faktor bei der Sekretion wird um so mehr nahegelegt, als die Annahme berechtigt ist, daß die durch die Erregung geweckten Vorgänge Aenderungen in der Oberflächenspannung hervorrufen könnten, wofür wir Analogien am Phänomen der Protoplasmabewegung besitzen.

Die Tatsache, daß bei einigen Drüsen die Sekretbestandteile in wesentlich größerer Konzentration als im Blute vorkommen, eine Tatsache, deren Erklärung schon deshalb Schwierigkeiten macht, weil eine Konzentrierung von Mineralbestandteilen in der Zelle der herrschenden Lehre von der Erhaltung des konstanten osmotischen Druckes widersprechen würde, ist auch durch chemische Theorien zu erklären versucht worden, nämlich durch die Annahme einer Salzbildung. Experimentelle Unterlagen für diese Annahme liegen vor, indem durch vitale Färbung der Niere gezeigt werden konnte, daß als Säuren und Basen injizierte Farbstoffe in der Zelle in der hiervon abweichenden Farbe des Farbstoffsalzes auftreten. Hiermit ist allerdings noch nicht erwiesen, daß die anorganischen Stoffe in Form von Salzen gespeichert werden. Nach dieser Richtung kann eine andere Vorstellung, nämlich die der Existenz von Ionenproteiden, herangezogen werden. Aus einer Reihe von chemischen Erfahrungen und biologischen Beobachtungen heraus ist die Hypothese aufgestellt worden, daß Eiweißkörper und anorganische Ionen eine Verbindung eingehen. Diese Hypothese kann für die Erklärung der Auslese bei der Sekretion fruchtbar sein, unter der Voraussetzung, daß die einzelnen Drüsenproteide physikalisch-chemisch verschieden sind. Anhaltspunkte hierfür sind vorhanden, indem beobachtet wurde, daß Lösungen von Eiweißkörpern der Pankreasdrüse und der Niere in ihrem physikalisch-chemischen Verhalten z. B., in ihrer Viskosität, von Salzen in verschiedener Weise beeinflußt werden, und zwar genau in dem Sinne, wie es dem funktionell verschiedenen Verhalten der betreffenden Salze in dem Pankreas und der Niere entspricht. Sowohl die salzartigen Bindungen wie die Ionenproteide werden in nicht gelöster, kolloider Form vorkommend in den Drüsenzellen angenommen, und auf diese Weise wären die aufgespeicherten anorganischen Stoffe nicht in der Lage, den osmotischen Druck in der Zelle zu beeinflussen.

Es ist eine ganze Reihe von Ansätzen vorhanden, das Problem der Drüsensekretion durch physikalisch-chemische Betrachtungen aufzuhellen. Was die eine Seite des Vorganges betrifft, das Auslesevermögen, so ist deren Verständnis weitgehend hierdurch gefördert worden, wenn man davon absieht, daß hier wie anderwärts der eigentliche Vorgang, der den Uebergang aus den ruhenden in den tätigen Zustand bedingt, die Erregung, unbekannt ist. Die andere Seite aber, das Scheidevermögen, harrt noch der Aufklärung. Vorläufig muß man sich damit bescheiden, daß das Studium der Sekretion, wie sie sich am lebenden Organismus abspielt, eine Fülle von Tatsachen hat erkennen lassen, welche als Bausteine zu einer künftigen Theorie dienen können.

Literatur. *Zusammenfassende Arbeiten. Handbuch der Physiologie der Absonderung und Aufsaugung (Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd.* V *I), von* ***R. Heidenhain, B. Luchsinger und E. Drechsel.*** *Leipzig 1883. — Handbuch der Physiologie von* ***Nagel.*** II. *Bd.: Physiologie der Drüsen usw. von* ***H. Boruttau, O. Cohnheim, R. Metzner, W. Nagel, E. Overton, J. Pawlow, H. Sellheim, E. Weinland und O. Weiss.*** *— Einzelarbeiten:* ***L. Asher,*** *Untersuchungen über die physiologische Permeabilität der Zellen. Biochem. Zeitschr., Bd. 14, 1908. —* ***W. M. Bayliss und E. H. Starling,*** *Die chemische Koordination der Funktionen des Körpers. Ergebn. d. Physiol., Bd.* V. *S. 664. —* ***F. Bottazzi,*** *Osmotischer Druck und Leitfähigkeit der Flüssigkeiten der einzelligen pflanzlichen und tierischen Organismen. Ergebn. d. Physiol.,* VII, *S. 161. —* ***A. B. Macallum,*** *Oberflächenspannung und Lebenserscheinungen. Ergebn. d. Physiologie,* XI, *S. 602. —* ***A. Noll,*** *Die Sekretion der Drüsenzelle. Ergebn. d. Physiologie,* IV, *84,* VI, *1. —* ***A. Pütter,*** *Vergleichende Physiologie. Kap. IV: Der Stoffaustausch. Jena 1911, S. 295. —* ***M. Verworn,*** *Allgemeine Physiologie. Mechanik der Aufnahme und Abgabe von Stoffen. Jena 1909, S. 639.*

Leon Asher.

Sekretion.

Innere Sekretion.

1. Historische Entwickelung der Lehre. 2. Begriffsbestimmung. 3. Chemische Charaktere und Wirkungsweise der Hormone im allgemeinen. 4. Die einzelnen Hormonorgane. 5. Das thyreo-para-thyreo-thymische System. a) Schilddrüse. α) Physiologische Wirkungen der Schilddrüsenstoffe. β) Ausfallserscheinungen nach Exstirpation der Schilddrüse. γ) Substitution des Organs. δ) Athyreosis und Hypothyreosis beim Menschen. ε) Hyperthyreosis. ζ) Zusammenfassung. b) Epithelkörperchen. α) Vergleichende Anatomie. β) Histologie. γ) Physiologische Bedeutung. c) Thymus. α) Morphologie. β) Physiologie. γ) Pathologie. 6. Nebennierensysteme. a) Adrenalsystem. α) Die Sekretion des Adrenalsystems. β) Chemische Charakterisierung des Adrenalins. γ) Wirkungsweise des Adrenalins. δ) Hyperadrenalismus.

b) Interrenalsystem. c) Die Nebenniere als ganzes Organ. 7. Hypophyse. α) Wirkung der Hypophysenextrakte. β) Exstirpationsversuche. γ) Hypophysenerkrankungen beim Menschen. δ) Zusammenfassung. 8. Zirbeldrüse. 9. Pankreas. 10. Magen- und Darmschleimhaut. 11. Keimdrüsen. α) Kastration. β) Substitution. γ) Innersekretorische Gewebselemente der Keimdrüsen. δ) Zusammenfassung.

1. Historische Entwickelung der Lehre. Vom morphologischen Gesichtspunkte ist die Sekretion, die Bildung und Ausscheidung spezifischer Produkte aus dem Blute, an eigenartig gebaute Organe, die Drüsen, geknüpft, welche im wesentlichen aus einem Blutgefäßnetz, einer aus epithelialen Zellen aufgebauten, absondernden Oberfläche und aus einem Ausführungsgang bestehen. Bei einer Anzahl von Organen, welche nach der Auffassung der Anatomen der Hauptsache nach aus einem Konvolut von Blutgefäßen bestehen sollten und daher als Blutgefäßknoten Ganglia vasculosa benannt wurden, war der drüsenähnliche Bau trotz des Mangels eines Ausführungsganges maßgebend für die Einreihung in eine besondere Abteilung der Drüsen, der Blutgefäßdrüsen oder Drüsen ohne Ausführungsgang. Als solche betrachtete Johannes Müller (1841) die Schilddrüse, die Nebenniere, die Thymusdrüse, die Plazenta und die Milz. A. Ecker (Handwörterbuch der Physiologie von R. Wagner 1853) präzisierte auf Grund der Struktur die Funktion der Blutgefäßdrüsen oder Blutdrüsen, zu welchen die Schilddrüse, Nebenniere, Thymusdrüse und der Hirnanhang zu zählen sind, „als Bildung eines Sekretes aus dem Blute und Ueberlieferung desselben an die Blutmasse“.

Vom physiologischen Standpunkte ist der Begriff der inneren Sekretion ein wesentlich weiterer. Er gründet sich auf die schon sehr alte Erfahrung, daß manche Organe des Tierkörpers, wie z. B. die Keimdrüsen, auf den Stoffwechsel einen bedeutsamen Einfluß besitzen, und auf die in der zweiten Hälfte des XIX. Jahrhunderts zum Teil auf experimentellem Wege, zum Teil aus den Erfahrungen am Menschen bei pathologischen Fällen gewonnene Erkenntnis, daß eine Reihe, ihrer Funktion nach unbekannter Organe, durch ihre bloße Anwesenheit im Körper, für die Erhaltung des Lebens notwendig oder geradezu unerläßlich sind. A. A. Berthold gelangte (1849) auf Grund seiner Transplantationsversuche der Hoden bei Hähnen als Erster zu dem Schlusse, daß der in den sekundären Geschlechtsmerkmalen sich äußernde Consensus zwischen den Keimdrüsen und den übrigen Teilen des Tierkörpers nicht auf nervösem Wege, sondern durch die produktive Tätigkeit des Hodens auf dem Blutwege zustande komme. Claude Bernard zeigte (1855) an der Leber, daß dieses Organ bei der Glykogenie, der Anhäufung des Glykogens und der Bildung des in die Blutbahn sich ergießenden Zuckers, durch eine Sécrétion interne, durch die Abgabe eines spezifischen Produktes an das Blut, die Zusammensetzung des „Milieu interne“ verändern kann. Als Vater der Lehre von der inneren Sekretion wird allgemein Brown Séquard (1869) angesehen, insofern mit Recht, als er auf Grund einer zielbewußten Gruppierung des vorliegenden Tatsachenmaterials allen drüsigen Organen, gleichgültig ob sie Ausführungsgänge besitzen oder nicht, die Funktion zuerkannte, Stoffe zu produzieren, welche auf dem Blutwege in entfernten Teilen Wirkungen entfalten. Er konnte (1889) die Existenz und die Bedeutung einer chemischen Korrelation zwischen den Organen durch die Wirkung der Einverleibung von Organextrakten experimentell nachweisen. In den letzten drei Dezennien wurde die Lehre von der inneren Sekretion durch die genaueren morphologischen Studien des Sekretionsvorganges, durch den Nachweis und Klarlegung des Chemismus der Sekretionsprodukte der einzelnen Organe, durch die Feststellung der Wirkungsweise der einzelnen inneren Sekrete, durch eingehendere experimentelle Untersuchungen über die Folgen des Ausfalles einzelner innersekretorischer Organe für den Gesamtorganismus und insbesondere durch die klinischen Erfahrungen über die Funktionsverminderung oder Funktionssteigerung endokriner Organe beim Menschen und durch die Erfahrungen der Organotherapie weiter ausgebaut.

2. Begriffsbestimmung. Jedes Organ, jedes Gewebe, in letzter Linie jede Zelle verändert die Zusammensetzung der Säftemasse und kann durch spezifische Produkte unter Vermittelung des zirkulierenden Blutes auf die übrigen Teile einen bestimmenden Einfluß ausüben.

Die im Organstoffwechsel entstandenen Produkte werden von ihren Bildungsstätten aus durch den Blutstrom in andere Organe transportiert und können dort zunächst entweder durch ihre stoffliche Beschaffenheit, oder als Energiequellen für den Aufbau oder die Leistungen dieser entfernten Organe dienstbar sein. Diesen, als Verbrauchssekrete zu betrachtenden Stoffen steht eine zweite Gruppe von Substanzen gegenüber, welche nur auf die Art und Weise der Verwendung der in den Organen bereits angesammelten Stoffe und Energien einen Einfluß ausübt. Diese, auf bestimmte Organe oder Zellen spezifisch wirkenden chemischen Boten, welche die Korrelation zwischen den einzelnen Körperteilen vermitteln, werden

nach der von Starling eingeführten Nomenklatur als Hormone, Reiz- oder Beeinflussungsstoffe (von ὁρμάω = erwecken, erregen) bezeichnet. In die Gruppe der innersekretorischen oder Hormonorgane werden demnach alle Gewebe einzubeziehen sein, bei welchen eine Produktion solcher Hormone nachzuweisen ist.

3. Chemische Charaktere und Wirkungsweise der Hormone im allgemeinen. Die in den einzelnen Organen gebildeten Reizstoffe sind ihrer chemischen Zusammensetzung nach nur zu einem geringen Teile bekannt und ihre Existenz wird vielfach nur aus den beim Wegfall des Organs eintretenden Funktionsstörungen in fernliegenden Gebieten, sowie aus der Wirkungsweise der Organextrakte erschlossen. Es können zweifellos Stoffe der verschiedensten Abstammung und der verschiedensten chemischen Struktur als Reizsubstanzen wirksam sein. Als ein am einfachsten gebautes Hormon ist die als Endglied der Oxydationsprozesse in allen Geweben entstandene Kohlensäure zu betrachten. Dieses allgemeine Stoffwechsel-Endprodukt vermittelt eine wichtige chemische Korrelation im Organismus, das ist die Regulation der normalen Atmung. Auch andere Abbauprodukte des Stoffwechsels können noch Hormonwirkungen entfalten. So bewirken z. B. der Harnstoff und die Harnsäure eine vermehrte Eiweißzersetzung und regulieren auf diese Weise gewissermaßen automatisch jenen Vorgang, welchem sie selbst ihre Entstehung verdanken. Die im Magendarmkanal vorhandenen, die Absonderung der verschiedenen Verdauungssäfte anregenden Sekretine sind ihrer chemischen Struktur nach offenbar unter dem Einfluß der Verdauungssäfte entstandene Eiweißabbauprodukte. Ein seiner chemischen Zusammensetzung nach genau bekanntes Hormon, das Adrenalin, werden wir später (siehe Abschnitt 6a) kennen lernen. Chemisch näher untersucht sind die anscheinend nicht einheitlichen Sekretionsprodukte der Schilddrüse, die Thyreoglobuline.

Unsere Kenntnisse über den Chemismus bei der Bildung der Reizstoffe sind heute noch äußerst spärlich, so daß es kaum möglich ist, die Hormone nach ihrer Genese oder nach ihrer Konstitution zu umgrenzen und zu klassifizieren. Zu ihrer Charakterisierung können folgende Merkmale verwendet werden: Die Produkte der inneren Sekretion müssen zumeist durch die Wand der Blutgefäße direkt, seltener unter Vermittelung der Lymphräume in die Blutbahn gelangen. Sie müssen, um als Reizstoffe in entfernten Organen tätig zu sein, rasch dahin gelangen und bereits in minimalen Mengen wirken können. Sie müssen, um dieselben Leistungen öfter wiederholen zu können, ohne zu einer schädlichen Ueberfunktion zu führen, leicht zerstörbar oder eliminierbar sein. Diesen Postulaten entsprechend werden eiweißartige Substanzen von Antigencharakter welche zu einer Antikörperbildung Veranlassung geben, zu physiologischen Hormonen kaum geeignet sein, und es werden als solche in erster Linie Körper von relativ niedrigem Molekulargewicht und einfacher Konstitution in Betracht kommen.

Nach der Wirkungsweise der Hormone können dieselben in zwei große, voneinander allerdings nicht scharf getrennte Gruppen geschieden werden. Die von ihnen hervorgerufenen Veränderungen können nämlich einerseits die Entwickelung und den Bau, andererseits die Leistungen der korrelativ verknüpften Organe betreffen. Die meisten innersekretorischen Organe wirken durch ihre Hormone nicht nur im ausgebildeten Organismus, sondern ihr Einfluß läßt sich auch — und zwar oft deutlicher noch — während der Entwickelung, insbesondere solange das Wachstum des Körpers nicht abgeschlossen ist, nachweisen. Dieser morphogenetischen Hormonwirkung steht die zweite Gruppe der funktionellen Korrelationswirkungen der Hormone gegenüber; hier handelt es sich um Abänderungen der Funktion entfernter Organe, entweder im Sinne einer Steigerung oder einer Minderung ihrer Tätigkeit.

Sowohl die im Bau als auch die in der Funktion sich manifestierenden Hormonwirkungen vollziehen sich auf dem Boden eines veränderten Chemismus. Die Reizstoffe können in das komplizierte chemische Getriebe der Organe und Gewebe direkt eingreifen, oder eine Modifikation der Organfunktionen durch einen abgeänderten Nerveneinfluß erzeugen, der aber seinerseits wieder nur durch einen veränderten Nervenchemismus herbeigeführt wird. Die Entscheidung der Frage, ob der Hormoneffekt durch eine direkte quantitative oder qualitative Variation des Organchemismus erzeugt und auch strukturell nachweisbar ist, oder ob derselbe durch das Nervensystem vermittelt wurde, bedarf in jedem Einzelfalle einer näheren Untersuchung. Diese wird allerdings dadurch kompliziert, daß die Hormonorgane miteinander in vielfach innigen Wechselbeziehungen stehen und daß zwischen einem Beeinflussungsorgan und dem dazugehörigen Erfolgsorgan noch viele andere Organe und Gewebe eingeschaltet sein können, so daß die Abschätzung der funktionellen Leistungen eines einzelnen auf große Schwierigkeiten stößt. Nach der Art ihrer Einwirkung auf die chemischen Vorgänge in der lebenden Substanz können wir

assimilatorische, die anabolische Phase des Stoffwechsels begünstigende, und dissimilatorische, in der katabolischen Phase wirksame Hormone unterscheiden. Der Wirkungseffekt der ersteren wird als Stoffansatz und Wachstum oder Hemmung einer Tätigkeit, die der letzteren als Stoffzerfall und Tätigkeitssteigerung in Erscheinung treten.

4. Die einzelnen Hormonorgane. Beim heutigen Stande unserer Kenntnisse können die endokrinen Organe weder auf der morphologischen Basis nach ihrer Gewebsstruktur, noch auf einer physiologischen Grundlage, etwa nach der Wirkungsweise der einzelnen inneren Sekrete systematisch gruppiert werden. Einem eingebürgerten Gebrauche folgend, sollen hier zunächst die Drüsen ohne Ausführungsgang und dann die sonstigen Beeinflussungsorgane besprochen werden. Zu den ersteren gehören das thyreo-parathyreo-thymische System, die beiden Nebennierensysteme, die Hypophyse und die Zirbeldrüse. Von sonstigen Organen, deren innere Sekretion für den Gesamtorganismus von Bedeutung ist, sollen das Pankreas und die Keimdrüsen näher erörtert und endlich die innere Sekretion des Magendarmtraktes kurz erwähnt werden.

5. Das thyreo-parathyreo-thymische System. Dieses System besteht aus drei genetisch, topographisch und anscheinend auch funktionell miteinander in nahen Beziehungen stehenden Organen: 1. der Schilddrüse (Glandula thyreoidea), 2. den Epithelkörperchen (Glandulae parathyreoideae) und 3. der Thymusdrüse (Glandula thymus).

Bei sämtlichen Wirbeltieren entsteht am kranialen Ende der Darmhöhle eine unpaare mediane Thyreoideaanlage, während an den lateral gelegenen drei kaudalen Schlundtaschen die branchiogenen Organe (Thymus, Epithelkörperchen, laterale Thyreoideaanlage oder postbranchialer Körper) zur Entwickelung gelangen.

5a) Schilddrüse. Die Schilddrüse verharrt bei den Knorpelfischen noch in ihrer ursprünglichen Form und Lagerung und steht mit der Pharynxhöhle durch einen Ausführungsgang in Verbindung. Bei den Knochenfischen ist sie noch ein unpaares, am vorderen Ende der Kiemenarterie gelegenes Organ. Sonst wächst die unpaare Schilddrüsenanlage kaudalwärts bis zur Perikardialhöhle, bildet sich durch Teilung zu einem paarigen Organ aus, und gelangt beim späteren Kaudalwärtsrücken des Herzens bei manchen Tierarten (Schildkröte, Krokodil, Vögel) in den Thoraxraum bis an die Bifurkationsstelle der Trachea.

Bei den Säugetieren und beim Menschen besteht die Schilddrüse aus zwei an den Seitenflächen des Kehlkopfes gelegenen Seitenlappen, die zuweilen durch eine Brücke miteinander verbunden sind. Bei ihrer Ausbildung ist neben der medianen Anlage noch eine aus der 5. Schlundtasche entstandene laterale Anlage oder der sogenannte postbranchiale Körper beteiligt. Der Entwickelungsgang des Organes macht es verständlich, daß in der ganzen Halsregion von der Zungenwurzel bis zur Perikardialhöhle versprengte Anteile als akzessorische Nebenschilddrüsen angetroffen werden können.

Die überaus reichlich vaskularisierte Schilddrüse zeigt einen follikulären Bau. Ihr Parenchym besteht aus Drüsenbläschen von wechselnder Größe und Form, den sogenannten Follikeln, welche mit einem kubischen oder zylindrischen Epithel ausgekleidet und mit einer eigenartigen, als Schilddrüsenkolloid bezeichneten Substanz gefüllt sind. In den Epithelien können im mikroskopischen Bilde die Zeichen einer Sekretionstätigkeit mit Sicherheit nachgewiesen werden. Das Sekretionsprodukt wird durch das Kolloid repräsentiert, welches durch die Lymphbahnen in den Blutkreislauf gelangt. Für die Frage der chemischen Natur des Schilddrüsensekretes ist der von Baumann (1895) geführte Nachweis, daß die normale Schilddrüse Jod in organischer Verbindung in erheblicher Menge enthält, von besonderer Bedeutung. Der Jodgehalt der Schilddrüse ist ein wechselnder nach der Tierart, nach dem Alter und vor allem nach der Größe der Jodzufuhr. Der Jodgehalt normaler Schilddrüsen des Menschen und der Tiere beträgt 0,3 bis 0,9 mg Jod auf 1 g Trockensubstanz und geht im allgemeinen parallel mit dem Kolloidgehalt. Das Schilddrüsenkolloid ist nach A. Oswald ein Gemenge von zwei Eiweißkörpern, Thyreoglobulinen. Der eine Eiweißkörper ist jodhaltig und gibt als hydrolytisches Spaltungsprodukt das Baumannsche Jodothyrin. Neben diesem Jodthyreoglobulin ist noch ein zweiter jodfreier phosphorhaltiger Eiweißkörper vom Charakter eines Nukleoproteids vorhanden. Das Thyreoglobulin wird im Inneren der Follikel gebildet und wahrscheinlich nach Jodierung als Kolloid in den Follikelraum ausgeschieden. Sichergestellt ist, daß die Schilddrüse das in den Körper gelangende Jod in spezifischer Weise aufspeichert und die Annahme, daß die Produktion des Jodthyreoglobulins die spezifische Sekretionstätigkeit des Organs darstellt, ist in hohem Grade wahrscheinlich.

a) Physiologische Wirkungen der Schilddrüsenstoffe. Wäßrige oder Glyzerinextrakte aus Schilddrüsen bewirken bei intravenöser Injektion Veränderungen in

der Zirkulation (Blutdrucksenkung, Pulsverlangsamung) und bei länger dauernder und wiederholter Zufuhr eine mehr oder minder ausgesprochene und anhaltende Tachykardie. Die gleichen Wirkungen kommen dem Jodothyrin, sowie jodierten Eiweißkörpern zu (v. Fürth und Schwarz). Die Schilddrüsenstoffe üben ferner einen Einfluß auf die Blutbeschaffenheit und auf das morphologische Blutbild aus. Sie wirken anregend auf die sekretorische Tätigkeit der Darmdrüsen und auf die Niere. Sie bewirken bei normal wachsenden Knochen ebenso wie bei Frakturen, eine Beschleunigung des Verkalkungsprozesses. Am konstantesten ist die Wirkung der Schilddrüsenstoffe auf den Stoffwechsel. Sie besteht beim normalen Tier in einer Vermehrung des Stickstoffumsatzes, Vermehrung der Wasserausscheidung und starker Erhöhung der Fettverbrennung. Unter der Einwirkung der Thyreoideastoffe tritt eine Körpergewichtsabnahme ein, die in erster Reihe zu einer Verminderung des Fettbestandes führt. Länger anhaltende Zufuhr von Schilddrüsenstoffen erzeugt Glykosurie. Die gleichen Wirkungseffekte auf den Stoffwechsel kommen auch dem Jodothyrin zu, doch kann dieses nicht als das spezifische Sekretionsprodukt der Schilddrüsen angesprochen werden. Da die Stoffwechselwirkung der Schilddrüsensubstanzen ihrem Jodgehalt parallel geht, so dürfte wahrscheinlich das Jod mittelbar, d. h. durch eine Sekretionsanregung der Schilddrüse in Aktion treten.

Die fortgesetzte Zufuhr von Schilddrüsenpräparaten kann bei Tieren und beim Menschen eine Reihe von pathologischen Symptomen hervorrufen, welche eine weitgehende Uebereinstimmung mit dem Krankheitsbild des menschlichen Morbus Basedowii aufweisen.

β) Ausfallserscheinungen nach Exstirpation der Schilddrüse. Die operative Entfernung der Schilddrüse bei Tieren oder des kropfig entarteten Organes beim Menschen hat eine Reihe schwerer Störungen im Stoffwechsel zur Folge, welche schließlich unter einer zunehmenden Abmagerung, unter dem Bilde einer Kachexia thyreo- oder strumipriva zum Tode führen. Bei jugendlichen, noch im Wachstum befindlichen Individuen zeigt sich ein auffälliges Zurückbleiben im Längenwachstum, welches in einer mangelhaften endochondralen Verknöcherung ihre Ursache hat. Daneben ist eine mangelhafte Entwickelung der Geschlechtsorgane zu beobachten, so daß die Geschlechtsreife nur sehr verspätet oder überhaupt nicht eintritt. Neben der somatischen ist auch eine psychische Minderentwickelung zu konstatieren, die sich in einer verminderten Beweglichkeit, Apathie, verringerter Intelligenz und verlangsamter Reaktion auf äußere Eindrücke manifestiert. Die Abnahme der muskulären und psychischen Leistungsfähigkeit tritt auch bei erwachsenen Individuen in Erscheinung. Besonders charakteristisch sind die die Haut betreffenden trophischen Störungen. Bei Tieren zeigt sich ein Struppigwerden des Felles, bei Schafen und Ziegen bemerkenswerte Veränderungen im Haarwuchs, beim Menschen neben einer trockenen abschilfernden Epidermis, auffallende Blässe und Kälte der Haut, Fehlen der Schweißsekretion, Haarausfall, insbesondere eine eigenartige ödematöse Schwellung (Myxödem), die dem ganzen Körper eine besondere Plumpheit, dem Gesichte einen starren Ausdruck verleiht. Die durch den Ausfall der Schilddrüse (Athyreose) bewirkten Veränderungen des Stoffwechsels bestehen in einer starken Herabsetzung des Grundumsatzes, so daß der Verbrauch des ruhenden Körpers auf 50 bis 60% des normalen sinken kann. Entsprechend der geringen Kalorienproduktion ist die Nahrungsaufnahme und der Eiweißumsatz sehr gering, die Stickstoffausscheidung auf sehr geringe Werte gesunken. Gleichzeitig besteht eine erhöhte Toleranz für große Zuckermengen. In dem verlangsamten Stoffwechsel und der Herabsetzung des Fettumsatzes ist der Grund für die krankhafte Ablagerung in den Geweben und für eine mehr oder minder hochgradige Fettablagerung zu erblicken.

γ) Die erfolgreiche Bekämpfung der Ausfallserscheinungen durch eine Substitution des Organs ist nicht nur von großer praktischer Wichtigkeit, sondern hat auch für das Verständnis der physiologischen Funktion der Schilddrüse eine weittragende Bedeutung gewonnen. Die Substitution ist zunächst durch Einpflanzung von Schilddrüsen oder Stücken von solchen unter die Haut, in die Muskulatur, Peritonealhöhle und besonders in reichlich vaskularisierte Organe, wie die Milz, das Knochenmark, bei Tieren und auch bei Menschen durchgeführt worden. Entsprechend der Einheilung der transplantierten Schilddrüse tritt ein rascher Rückgang der thyreopriven Erscheinungen ein, der so lange anhält, als das Transplantat funktionsfähig geblieben ist. Mit dem nach kürzerer oder längerer Zeit eintretenden Zugrundegehen des Schilddrüsengewebes setzen die Ausfallssymptome wieder ein. Von größerer praktischer und theoretischer Bedeutung ist die Substitutionstherapie durch Zufuhr von Schilddrüsenstoffen. Sie gelingt nicht nur durch intravenöse und subkutane Injektion von Schilddrüsenstoffen, sondern auch bei Verfütterung mit

getrockneter Schilddrüse. Die ununterbrochene Zufuhr von Schilddrüsenpräparaten per os kann das Auftreten der Schilddrüsenkachexie verhüten und beim Menschen den vollständigen Ausfall der Schilddrüse vollgültig auf Jahre und Jahrzehnte ersetzen (Th. Kocher). Durch die Schilddrüsenzufuhr verschwindet die auffälligste Abweichung des Stoffwechsels, die Herabsetzung des Energieumsatzes. Es tritt ein vollständiger Umschwung im Eiweißhaushalt ein. Mit dem Aussetzen der Organtherapie erscheinen wieder die Störungen im Stoffwechsel, sowie einzelne Krankheitserscheinungen.

δ) Auf dem Ausfall oder doch einer Verminderung der Schilddrüsentätigkeit (Athyreosis und Hypothyreosis) beruht eine Reihe von Krankheitsbildern beim Menschen. Das reinste, durch die Natur ausgeführte Experiment eines totalen Schilddrüsenausfalles (Thyreoaplasie Pineles) liegt beim sogenannten kongenitalen Myxödem vor. Infolge einer Entwickelungshemmung besteht hier ein vollständiger Mangel der Schilddrüse; demnach zeigen sich die der operativen Athyreosis völlig entsprechenden Symptome: ausgesprochener Zwergwuchs, schwere Idiotie und schwere Erscheinungen des Myxödems, in der frühesten Kindheit beginnend. Auf einer Verminderung der Schilddrüsentätigkeit beruhen ferner das in manchen Ländern ziemlich häufige idiopathische Myxödem der Erwachsenen, das im jugendlichen Alter einsetzende infantile Myxödem, der hypothyreotische Zwergwuchs und insbesondere der in sozialer Beziehung besonders bedeutungsvolle endemische Kretinismus. Symptomatologisch stehen diese Krankheitsbilder in völliger Analogie zu der operativen Athyreosis. Indem die Schilddrüsenstoffe geradezu spezifische Heilmittel für diese Krankheitszustände darstellen, bildet die Substitutionstherapie einen Beweis für das Fehlen oder ein ungenügendes Funktionieren der Schilddrüse. Beim Kretinismus findet man nur in einer geringen Anzahl von Fällen eine atrophische, zumeist eine in ihrem Volumen beträchtlich vergrößerte Schilddrüse, einen sogenannten Kropf (Struma) vor; doch zeigt die anatomische Untersuchung beim endemischen Kropf der Gebirgsländer ein funktionell minderwertiges Schilddrüsengewebe. Die überraschend günstigen Erfolge einer systematisch durchgeführten Schilddrüsentherapie beim endemischen Kretinismus beweisen seine Zugehörigkeit zu den durch Hypothyreoidismus bedingten Krankheiten.

ε) Als eine Funktionsanomalie im Sinne einer gesteigerten Tätigkeit der Schilddrüse (Hyperthyreosis) ist der Morbus Basedowii zu betrachten. Als wichtigste Beweise hierfür wären anzuführen: 1. Der auffällige Antagonismus im Symptomenbild gegenüber der Athyreosis. Er erstreckt sich auf alle einzelnen Krankheitserscheinungen, manifestiert sich aber insbesondere in der Stoffwechselstörung am deutlichsten. Die Basedowkranken haben einen vermehrten Energieumsatz, eine gesteigerte Kalorienproduktion, zeigen eine Steigerung des Eiweißverbrauches und Eiweißbedarfes, eine gesteigerte Fettverbrennung, eine herabgesetzte Toleranz für Kohlehydrate, und dementsprechend oft eine auffällige Abmagerung. 2. Die konstant anzutreffende Veränderung in der Struktur der Schilddrüse; sie ist vergrößert und zeigt histologisch die Merkmale einer gesteigerten Sekretionstätigkeit. 3. Die therapeutischen Erfolge einer operativen Behandlung, welche eine Verkleinerung des Basedowkropfes herbeiführt. Je mehr von der erkrankten Schilddrüse weggenommen wird, um so rascher und auffälliger tritt ein Rückgang aller Erscheinungen, insbesondere auch der Stoffwechselsteigerung ein.

ζ) Zusammenfassung. Aus dem gesamten über die Schilddrüse unter physiologischen und pathologischen Verhältnissen vorliegenden Tatsachenmateriale gelangen wir zu folgender Auffassung der Schilddrüsenfunktion: Die Schilddrüse ist ein sezernierendes Organ, welches das Produkt seiner sekretorischen Tätigkeit, wahrscheinlich in der Form eines jodhaltigen Eiweißkörpers, in letzter Linie in die Blutbahn abgibt. Das innere Sekret der Schilddrüse bildet für eine große Reihe von Geweben einen dissimilatorischen Reizstoff, indem es einen verstärkten Stoffabbau und eine Steigerung normaler Tätigkeiten auslöst. In diesem Sinne wird vor allem der Stoffwechsel, die Tätigkeit des Herzens und mancher Teile des sympathischen Nervensystems sowie auch eine Reihe von endokrinen Organen (vor allem die Hypophyse) beeinflußt. In anderen Gebieten wirkt das Schilddrüsensekret im Sinne eines assimilatorischen Hormons. Die Förderung des Knochenwachstums und der Entwickelung der Keimdrüsen, sowie die Einschränkung der innersekretorischen Pankreastätigkeit sind als Beispiele hierfür anzuführen. Unentschieden ist noch die Frage, ob diese antagonistischen Hormonwirkungen durch direkte Beeinflussung des Organchemismus, etwa durch zwei differente Reizstoffe, oder einheitlich aber indirekt unter Vermittelung des vegetativen Nervensystems zustandekommen. Der Sekretionsprozeß der Schilddrüse scheint unter dem Einflusse des Nervensystems zu stehen (Asher und Flack).

5b) Epithelkörperchen. Die Epithelkörperchen oder Beischilddrüsen (Glan-

dulae parathyreoideae) bilden den zweiten, mit der Schilddrüse in engen topographischen Beziehungen stehenden Teil des thyreo-parathyreo-thymischen Systems. Sie sind erst in neuerer Zeit (Sandström 1880) entdeckt und als selbständige Organe eigener Art erkannt worden (A. Kohn 1895). Als Derivate der Kiemenspalten treten sie zuerst bei den Amphibien auf und entwickeln sich hier, sowie bei den Reptilien und Vögeln als Epithelknospen am ventralen Ende der III. und IV., seltener der II. und V. Kiemenspalte. Bei den Säugetieren entstehen die Epithelkörperchen gleichfalls aus der III. und IV. Kiementasche. An diesen Schlundtaschen bilden sich epitheliale Verdickungen, welche die Anlage für je ein Epithelkörperchen und eine Thymus darstellen, und zwar gehen umgekehrt wie bei den niedrigen Wirbeltieren aus den dorsokranialen Verdickungen die Epithelkörperchen, aus den ventralen Divertikeln die Thymusanlagen hervor. Im Verlaufe der weiteren Entwickelung erfährt der ganze Komplex der aus den Kiementaschen hervorgehenden branchiogenen Gebilde Lageveränderungen, welche durch ihre Beziehungen zu der definitiven Thymus und zur Schilddrüse bedingt sind. Die Glandulae parathyreoideae und parathymicae III bleiben gewöhnlich im Zusammenhang, so daß bei fast allen Säugetieren der definitiven Thymus angeschlossen Epithelkörperchengewebe, oder umgekehrt an den Epithelkörperchen Thymusgewebe haften bleibt. Die Derivate der IV. Kiementasche, Glandulae parathyreoideae und parathymicae IV erlangen sekundären Anschluß an die Schilddrüse; so gelangt bei vielen Spezies das Epithelkörperchen IV in das Innere der Schilddrüse und wird von einem Thymusläppchen und überdies häufig noch von dem aus der V. Kiementasche sich entwickelnden postbranchialen Körper begleitet.

α) Vergleichende Anatomie. Die definitive Lagerung der branchiogenen Organe, sowie die Vollständigkeit ihrer Ausbildung weisen große Unterschiede bei den einzelnen Spezies auf. Bei den Wiederkäuern gelangt das Epithelkörperchen III mit dem Kopfteil der Thymus III kranialwärts und findet sich z. B. bei Schaf und Ziege an der Teilungsstelle der Karotis. Das Epithelkörperchen IV liegt der Schilddrüse äußerlich an oder ist in das Innere des Organs eigenbettet. Bei den Fleischfressern finden sich beide Epithelkörperchen in inniger Beziehung zur Schilddrüse, das Epithelkörperchen III liegt ihrer Außenfläche gewöhnlich am oberen Pole an (äußeres Epithelkörperchen), das Epithelkörperchen IV ist in das Innere der Schilddrüse verlagert (inneres Epithelkörperchen). Beim Kaninchen gelangt das Epithelkörperchen III kaudalwärts von der Schilddrüse und liegt typisch an der Karotis. Ueberdies sind zahlreiche akzessorische Epithelkörperchen, offenbar Derivate der III. Kiementasche, in der Thymus nachzuweisen. Das Epithelkörperchen IV liegt im Inneren der Schilddrüse. Beim Meerschweinchen, Maus und Ratte findet man typischerweise nur das Epithelkörperchen III in und an der Schilddrüse, sowie eine überaus große Zahl kleiner und kleinster akzessorischer Epithelkörperchen, auf der ganzen Strecke von der Schilddrüse bis in die Thymus sich fortsetzend. Die Anlage des Epithelkörperchen IV fehlt.

Die Epithelkörperchen des Menschen liegen der Schilddrüse angeschlossen, jedoch stets außerhalb der Kapsel, und zwar das Epithelkörperchen III (unteres Epithelkörperchen) am aboralen Rande, das Epithelkörperchen IV (oberes Epithelkörperchen) am kranialen Rande der Dorsalfläche des Schilddrüsenlappens. Auch hier finden sich akzessorische Körperchen im lockeren Fettgewebe der Halsregion und häufig noch weiter kaudalwärts bis in den Brustraum hinabreichend. Die Hauptorgane sind rundliche, ovale oder nierenförmig gestaltete, ungefähr 2 bis 5 cg schwere, goldrote bis braunrote Körperchen, welche von Zweigen der Gefäße der Schilddrüse reichlich mit Blut versorgt werden.

β) Histologie. Die histologische Struktur der Beischilddrüsen berechtigt zu ihrer Bezeichnung als Epithelkörperchen. Von einer bindegewebigen Kapsel umschlossen finden sich mehr oder weniger regelmäßige zylindrische Epithelstränge, welche von einem sehr dichten Kapillarnetz durchzogen werden. Die Zellstränge bestehen der Hauptsache nach aus zwei Zellarten, den ziemlich großen, schlecht färbbaren Hauptzellen, welche im Embryonalleben allein vorhanden sind, und den kleineren, granulierten oxyphilen Zellen. Für das Vorhandensein eines Sekretionsvorganges spricht der Befund von Fettkörnchen und von Glykogen in den Zellen, sowie das Vorkommen von Kolloid teils in Form von intrazellulären Kügelchen, teils als größere Massen, welche von follikelähnlich angeordneten Zellen umgeben sind.

Die chemische Untersuchung der Epithelkörperchen ergab Jod in geringen Mengen und ein jodfreies Nukleoproteid, dem eine spezifische Wirkung zukommen soll.

γ) Die physiologische Bedeutung der Glandulae parathyreoideae ergab sich zunächst aus den Folgeerscheinungen, welche man nach der Entfernung der Schilddrüse und damit auch der mit ihr verbundenen Epithelkörperchen bei Tieren und

bei Menschen wahrnehmen konnte. Nach der totalen Strumektomie ist beim Menschen eine rasch einsetzende, in schweren Krämpfen sich äußernde Erkrankung, die wegen ihrer Aehnlichkeit mit einem längst bekannten Krankheitsbilde des Menschen „Tetanie“ genannt wurde, zur Beobachtung gelangt. Bei manchen Tierarten, insbesondere bei Karnivoren, trat nach der Schilddrüsenentfernung stets eine unter den schwersten Muskelkrämpfen zum Tode führende Tetanie ein, während bei Herbivoren die erwachsenen Tiere die Operation zunächst ohne merkliche Schädigung vertrugen. Es konnte aber gezeigt werden, daß auch die letzteren (Kaninchen) an Tetanie erkranken, wenn man nicht nur die Schilddrüse, sondern auch die von ihr örtlich getrennten Glandulae parathyreoideae entfernt (Gley). Aus weiteren Versuchen (Vassale und Generali, Biedl u. A.) ergab sich dann, daß die nach der Entfernung der Schilddrüse auftretende akute nervöse Erkrankung in ihrer Genese von der Schilddrüse unabhängig und nur durch Mitentfernung der Epithelkörper bedingt ist, denn auch die alleinige Entfernung der Epithelkörperchen führt zu einer Tetanie, während die Exstirpation der Schilddrüse allein mit Erhaltung der Epithelkörperchen die bereits erörterte Kachexia thyreopriva zur Folge hat.

Die Tetania parathyreopriva tritt nach Entfernung aller Epithelkörperchen bei allen untersuchten Tierarten gewöhnlich schon nach 1 bis 2 Tagen auf und äußert sich zunächst in einer Uebererregbarkeit der peripheren Nerven gegen mechanische, chemische und vor allem elektrische Reize, weiterhin in fibrillären Zuckungen in einzelnen Muskeln und endlich in zunehmend intensiven Krämpfen, welche sich auf alle Muskeln des Körpers erstrecken und zu einem tetanischen Anfall steigern können, welchem die Tiere häufig erliegen. Neben klonischen Zuckungen können auch, namentlich bei jüngeren Tieren, anhaltende tonische Krämpfe zur Beobachtung gelangen. Neben den nervösen Erscheinungen sind trophische Störungen (struppiges Fell, Haarausfall, hochgradige Abmagerung) namentlich bei jenen Tieren zu beobachten, welche die Parathyreoidektomie längere Zeit überleben. Bei der Rattentetanie, welche einen auffallend chronischen Verlauf hat, beobachtet man als konstante Veränderung trophische Störungen an den Nagezähnen, welche einerseits in einer mangelhaften Verkalkung des Dentins, andererseits in Hypoplasien des Schmelzes bestehen (Erdheim). Bei jungen Ratten sieht man ein Zurückbleiben im Wachstum und Veränderungen an den Knochen, welche an die Rachitis erinnern. Spontan oder künstlich erzeugte Knochenfrakturen heilen nach der Epithelkörperchenexstirpation viel langsamer, unter Bildung eines auffallend kalkarmen, typisch rachitischen Callus.

Die partielle Parathyreoidektomie mit Hinterlassung von 1 bis 2 Epithelkörperchen hat zunächst keine Störungen zur Folge, doch befinden sich solche Tiere in einem Zustande der latenten Tetanie, wobei durch eine hinzutretende Störung im Stoffwechsel (z. B. durch Einverleibung von Giften, durch Ermüdung, insbesondere aber durch eine Gravidität) die Erscheinungen der Tetanie manifest werden können.

Beim Menschen können eine Reihe von Krankheitsbildern auf einen Ausfall oder auf eine Insuffizienz der Epithelkörperchenfunktion bezogen werden. Die Tetanie nach Kropfexstirpation, wie sie namentlich früher vor der Kenntnis und Beachtung der Bedeutung der Epithelkörperchen zur Beobachtung gelangt ist, kann wohl in der gleichen Weise auf eine Mitentfernung oder Läsion der Epithelkörperchen bei der Strumaoperation zurückgeführt werden, wie die experimentelle Tetanie der Tiere. Auch für die sonstigen, in der menschlichen Pathologie vorkommenden Formen der Tetanie (endemisch-epidemische Arbeitertetanie, Maternitätstetanie, Kindertetanie usw.) ist die einheitliche pathogenetische Grundlage in einer absoluten oder relativen Insuffizienz der Epithelkörperchen zum Teil schon durch positive pathologisch-anatomische Befunde (Blutungen, degenerative und atrophische Veränderungen in diesen Organen) bewiesen, zum Teil durch die weitgehende Analogie mit den experimentellen Erfahrungen an Tieren wahrscheinlich gemacht.

Die gesicherte Erkenntnis, daß die Tetanie eine Folge des Ausfalles der Epithelkörperchenfunktion ist, zeigte den Weg für die therapeutische Beeinflussung dieser Krankheit durch Substitution des fehlenden Gewebes. Die Organtherapie, welche beim Ausfall der Schilddrüse so glänzende Erfolge aufzuweisen hat, erwies sich bei den Epithelkörperchendefekten nicht als hinreichend. Nebenbei bemerkt konnten aber durch Schilddrüsenpräparate Heilerfolge erzielt werden, welche auf einen funktionellen Zusammenhang zwischen Schilddrüse und Epithelkörperchen hinweisen. Die Implantation von eigenen und fremden Epithelkörperchen derselben Tierart kann das Auftreten der Ausfallserscheinungen nach der Parathyreoidektomie hintanhalten. Auch die beim Menschen in Tetaniefällen ausgeführten Epithelkörperchentransplantationen waren von Erfolg begleitet.

Die parathyreoprive Tetanie macht so sehr den Eindruck einer Intoxikation, daß

die Annahme naheliegt, im Körper der Tetaniekranken kreise ein spezifisches Gift, welches unter normalen Verhältnissen von den Epithelkörperchen entgiftet wird. Tatsächlich konnte gezeigt werden, daß bei dieser Erkrankung eine schwere Stoffwechselstörung besteht, die ihren Ausdruck in einer nachweisbaren Azidosis findet. Das hypothetische Tetaniegift könnte in gewissen Eiweißabbauprodukten von basischem Charakter gesucht werden.

Ein besonderes Interesse verdienen die Beziehungen der Epithelkörperchen zum Kalkstoffwechsel, welche einerseits in den oben erwähnten Veränderungen an den Zähnen und im Knochenwachstum der parathyreopriven Tiere, sowie in den bei der menschlichen Osteomalazie nachgewiesenen Veränderungen der Epithelkörperchen ihren morphologischen Ausdruck finden, und andererseits durch die günstige Beeinflussung der beim Epithelkörperchenausfall bestehenden nervösen Uebererregbarkeit durch Zufuhr von Kalksalzen wahrscheinlich gemacht werden.

5c) Thymus. Das dritte Organ des thyreo-parathyreo-thymischen Systems, die Thymusdrüse (Briesel, Glandula thymus), entwickelt sich bei den niederen Wirbeltieren aus epithelialen Knospen an der dorsalen Seite aller Kiemenspalten. Bei den Säugetieren hat der Hauptthymus seinen Ursprung aus einer ventralen Epithelverdickung der III. Schlundtasche. Die beiderseitigen Thymusanlagen verlängern sich in kaudaler Richtung und verbinden sich zu einem scheinbar einfachen, hinter dem Brustbein im Mediastinalraum gelegenen Organ. Dieses scheint unter normalen Verhältnissen nicht während des ganzen Lebens in der gleichen Weise zu funktionieren. Beim Menschen besteht nur während der Kindheit und im Wachstum eine fortschreitende Entwickelung der Thymusdrüse. Im Alter von 10 bis 15 Jahren erreicht sie ihren Höhepunkt und unterliegt dann einem raschen Rückbildungsprozesse, um in dem rückgebildeten Zustande noch bis ins höchste Alter zu verharren.

α) Morphologie. Den Grundstock des aus Lappen und Läppchen bestehenden Organs bildet histologisch ein retikuliertes Stützgewebe (Thymusretikulum), das seiner Genese nach epithelialer Natur ist. In den Maschen des Retikulums sind als weitere histologische Komponenten die das eigentliche Thymusparenchym darstellenden kleinen Thymuszellen in den Rindenpartien des Organs und die eigenartigen, konzentrisch geschichteten, großen, aus den Retikulumzellen abstammenden epithelialen Hassalschen Körperchen in die Marksubstanz eingebettet gelagert. Die mit den Blutlymphozyten in morphologischer und biologischer Beziehung identischen, kleinen Thymuszellen sind nach den Untersuchungen Hammars als echte, aus dem Blute eingewanderte Lymphozyten zu betrachten. Während der Histogenese der Thymusdrüse entsteht aus dem ursprünglich epithelialen Organ ein der Struktur nach den Lymphdrüsen ähnliches. Dieses unterliegt dann frühzeitiger und deutlicher als alle anderen Organe des Körpers einer Altersinvolution und ist überdies auf jeder Altersstufe unter dem Einfluß gewisser allgemeiner Störungen, besonders nutritiver Art, einer akzidentellen Involution unterworfen.

β) Physiologie. Die zur Aufklärung der funktionellen Bedeutung der Thymusdrüse unternommenen Versuche der Exstirpation ergaben schon in der Frage der Lebenswichtigkeit des Organs bemerkenswerte Differenzen nach der Tierart. Bei Säugetieren ist die Entfernung der Thymusdrüse nicht als ein lebenbedrohender Eingriff anzusehen, doch äußern sich die Folgen der Exstirpation in einer Reihe von schweren Störungen, welche auf eine wichtige Rolle des Organs im Körperhaushalte hinweisen. Es zeigen sich Störungen in der Entwickelung und im Wachstum der Tiere, vor allem eigenartige, auf einen Mangel an ungelöstem Kalk beruhende Knochenveränderungen, Alterationen im Gebiete des zentralen und peripheren Nervensystems und insbesondere Veränderungen in der Entwickelung der Keimdrüsen. Hier wäre zu bemerken, daß umgekehrt auch die Keimdrüsen ihrerseits einen ausschlaggebenden Einfluß auf die Entwickelung und Beschaffenheit der Thymusdrüse entfalten. Kastration vor der Pubertät hat eine Zunahme im Volumen und im Parenchym des Thymus zur Folge, während andererseits die Altersinvolution des Organs mit dem Beginne der Geschlechtsreife zusammenfällt.

Genetisch und morphologisch sowie auf Grund der Exstirpationsversuche kann der Thymus wohl als eine Drüse mit innerer Sekretion betrachtet werden, wenn auch die physiologischen Wirkungen des von ihr gelieferten Sekretes noch nicht genügend bekannt sind. Die Untersuchung der Wirkungen der Thymusextrakte, sowie die Implantationsversuche der Thymus haben bisher über die physiologische Bedeutung des Organs keine wesentlichen Aufklärungen gebracht.

γ) Pathologie. Viel wichtiger in dieser Richtung sind die Erfahrungen der menschlichen Pathologie über den sogenannten

Status thymico-lymphaticus. Man konnte bei plötzlichen Todesfällen anscheinend gesunder erwachsener Menschen infolge geringer Veranlassungen (insbesondere im Beginne einer Chloroformnarkose) bei der Sektion Zeichen einer besonderen Konstitutionsanomalie antreffen, bei welcher ein die Norm übersteigender Parenchymwert oder eine Hyperplasie des Thymus und des lymphatischen Apparates, ein wesentliches Merkmal bildet (A. Paltauf). Daneben finden sich noch Zeichen einer Unterentwickelung, einer Hypoplasie des ganzen Körpers, sowie vieler Organe und Gewebe (abnorme Kleinheit des Herzens, Enge der Aorta und anderer Gefäße, zarter Knochenbau, Hypoplasie des Genitalapparates und dementsprechend mangelhafte Entwickelung der sekundären Sexualcharaktere, Hypoplasie der Nebenniere und des Adrenalsystems). Die Frage, ob beim Zustandekommen dieser hypoplastischen Konstitution der vergrößerten Thymusdrüse eine ursächliche Bedeutung zukommt oder ob die Vergrößerung dieses Organs nicht etwa nur eine Teilerscheinung einer Anomalie in der Gesamtorganisation des Körpers darstellt, kann bei dem heutigen Stande der Kenntnisse noch nicht mit Sicherheit entschieden werden.

6. Nebennierensysteme. Bei allen Wirbeltieren sind in der Bauchhöhle paarige Organe anzutreffen, welche den Namen Nebennieren erhielten, weil bei den Säugetieren diese Organe mit den Nieren in topographischen Beziehungen stehen. Die vergleichende Anatomie und Entwickelungsgeschichte zeigt jedoch, daß bei den niederen Vertebraten einheitlich geschlossene Nebennieren überhaupt nicht vorkommen und bei den höheren Vertebraten die Nebennieren weder morphologisch noch genetisch einheitliche Organe darstellen, sondern aus der teilweisen Vereinigung von zwei verschiedenen, voneinander unabhängigen Organsystemen hervorgegangen sind.

Die einheitliche Säugernebenniere besteht strukturell aus zwei völlig verschiedenen Bestandteilen, der epithelialen, durch Einlagerung von Lipoidsubstanzen charakterisierten Rinde und aus der durch eine spezifische Affinität ihrer Zellen zu Chromsalzen ausgezeichneten Marksubstanz. Diese zwei Grundgewebe sind bei allen Wirbeltieren mit Ausnahme des Amphioxus anzutreffen und daher als allgemeiner Bestandteil des Vertebratenleibes aufzufassen. Bei den Fischen sind die beiden Gewebstypen als zwei verschiedene Organsysteme (System der Interrenalkörper oder Stanniussche Körperchen, und die den sympathischen Grenzstrangganglien angeschlossenen Suprarenalorgane oder Adrenalsystem) räumlich in weitem Ausmaße getrennt, wenn auch bei den Teleostiern schon eine teilweise Vereinigung beider, also die ersten Andeutungen einer wirklichen Nebenniere anzutreffen sind. Bei den Amphibien findet eine partielle Aneinanderlagerung beider Systeme statt, wobei ein Teil des Adrenalsystems doch in Form einzelner, mit dem Sympathicus in Verbindung stehender Abschnitte, seine Unabhängigkeit bewahrt. Bei den Reptilien und Vögeln wird die Verbindung eine innigere; doch findet man auch hier selbständige Anteile des Adrenalsystems im ganzen Sympathicus. Bei den Säugern endlich ist die völlige Vereinigung von gewissen Anteilen beider Systeme in der eigenartigen topographischen Anordnung eingetreten, daß ein dem Adrenalsystem angehöriges Gewebe als zentrales Mark von einem Interrenalgewebe als peripherer Rinde umschlossen wird. Doch findet man auch hier noch beträchtliche Abschnitte des Adrenalsystems als selbständige Formationen längs des sympathischen Nervensystems als einzelne chromaffine Zellen oder Vereinigung von mehreren zu größeren chromaffinen Körpern, den sogenannten Paraganglien (A. Kohn). Andererseits sind die früher unter dem Namen „akzessorische Nebennieren" zusammengefaßten Organe, welche man in der Nähe der Nebenniere, in die Niere versprengt, im ganzen Retroperitonealraum und insbesondere in der Nähe der Keimdrüsen findet, ihrem histologischen Baue nach als freie Anteile des Interrenalsystems zu betrachten und richtiger als „Beizwischennieren" zu bezeichnen.

Genetisch ist das Interrenalsystem ein Abkömmling des Mesoderms und entwickelt sich aus dem Cölomepithel in einer der Urniere und der Keimdrüsenanlage benachbarten Zwischennierenregion. Bei den Cyclostomen und Selachiern verharrt es in diesem Zustande der Selbständigkeit zeitlebens. Das Adrenalsystem ist ein Derivat des Ektoderms; es entwickelt sich gemeinsam mit dem Sympathicus aus eigenartigen Bildungszellen, welche sich teils zu Nervenzellen, teils zu chromaffinen Zellen differenzieren. Das Adrenalsystem der Selachier, die sogenannten Suprarenalkörper, bleiben zeitlebens den sympathischen Ganglien angeschlossen. Bei den Amphibien und Amnioten finden sich Teile des Adrenalsystems gleichfalls in Form von Einlagerungen chromaffinen Gewebes in die sympathischen Ganglien und Geflechte, ferner aber auch als relativ autonome größere Gebilde, Paraganglien (z. B. Karotisdrüse, Zuckerkandelsche Nebenorgane des Sympathicus). Bei den höheren Wirbeltieren verliert ein beträchtlicher Anteil des Adrenalsystems

seine Selbständigkeit und gelangt im weiteren Verlaufe der Organogenese mit Teilen des Interrenalsystems zur Vereinigung. An die inzwischen reduzierte embryonale Zwischenniere treten sympathische Bildungselemente heran, dringen in dieselbe ein und erlangen, wenn sie bei den Säugern das Zentrum okkupieren, ihren definitiven histologischen Charakter als chrombraune Zellen.

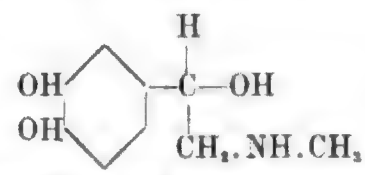
Die vergleichende Embryologie beweist somit die Selbständigkeit beider Nebennierensysteme, zeigt aber zugleich eine in der Phylogenese stetig zunehmende und inniger werdende Vereinigung derselben.

In funktioneller Richtung sind die beiden Nebennierensysteme gleichfalls im weiten Ausmaße voneinander unabhängig, eine Tatsache, die nur deswegen lange Zeit nicht klar zum Ausdruck gelangt ist, weil sich die physiologische Forschung zunächst nur mit der Funktion der einheitlichen Nebenniere beschäftigt hatte.

6a) Adrenalsystem. Zu diesem gehören: 1. die Marksubstanz der Nebenniere und 2. die außerhalb der Nebenniere gelegenen, größtenteils dem Sympathicus angeschlossenen freien Anteile, die sogenannten Paraganglien. Morphologisch zeigt das Adrenalgewebe überall wo es vorkommt im wesentlichen den gleichen Aufbau: Stränge und Ballen von Zellen, welche von einem zarten bindegewebigen Gerüst zusammengehalten, ein weitmaschiges Netz bilden und überall den Blutgefäßen innig anliegen. Die relativ großen, polygonal oder unregelmäßig geformten Zellen mit bläschenförmigen chromatinarmen Kernen sind durch die von Henle entdeckte Eigentümlichkeit, sich mit chromsauren Salzen gelb bis braun zu färben, besonders gekennzeichnet. Bei der Behandlung mit Eisenchlorid geben diese Zellen eine Grünfärbung (Vulpiansche Reaktion). Das Zellprotoplasma der lebenden chrombraunen Zellen enthält feinere und gröbere Granula, die in erster Reihe die Träger der Eisenchlorid- und Chromreaktion sind. Im Verlaufe des Sekretionsvorganges beladen sich die Granula zunehmend mit chrombraunem Sekret und geben dasselbe an das Zellplasma und weiterhin auf dem Wege der Diffusion durch die Kapillarwand in die Blutbahn ab.

α) Die Sekretion des Adrenalsystems. Das Gewebe der Nebenniere, sowie das dem Organ entströmende Blut gibt, wie Vulpian (1856) als Erster feststellen konnte, eine charakteristische Grünfärbung mit Eisenchlorid. Wäßrige Extrakte aus der Nebenniere haben bei der intravenösen Einverleibung gut charakterisierbare physiologische Effekte, insbesondere eine eigenartige blutdrucksteigernde Wirkung (Oliver und Schäfer 1894, Cybulski und Szymonowicz 1895). Die blutdrucksteigernde und die eisengrünende Substanz sind identisch und nur in Extrakten der Marksubstanz enthalten. Die Interrenalorgane der Selachier geben keine Farbenreaktion und kein physiologisch wirksames Extrakt. Die Suprarenalkörper dieser Tiere ebenso wie die chromaffinen Paraganglien der Säugetiere liefern Extrakte mit den charakteristischen chemischen und physiologischen Reaktionen. Es unterliegt demnach keinem Zweifel, daß jenes Gewebe, welches sich histologisch durch die Chromaffinität seiner Zellen auszeichnet, eine eigenartige Substanz enthält. Daß in diesem Gewebe eine ständige Produktion und Abgabe dieser Substanz an die Blutbahn stattfindet, geht schon aus dem histologischen Bilde mit Sicherheit hervor. Das Sekretionsprodukt des Adrenalgewebes kann aber auch zunächst im Blute der Nebennierenvenen und dann, da es ständig in den allgemeinen Kreislauf gelangt, überall im Blute nachgewiesen werden. Der Sekretionsvorgang des Adrenalsystems steht unter dem Einflusse des sympathischen Nervensystems (Biedl u. A.). Das Sekretionsprodukt des Adrenalsystems konnte aus Nebennierenauszügen kristallisiert dargestellt werden (Takamine 1901) und erhielt die Bezeichnung „Adrenalin".

β) Chemische Charakterisierung des Adrenalins. Das Adrenalin ist eine Base, die sich im Wasser schwer, bei Zusatz von verdünnten Säuren unter Bildung von Salzen leicht löst. Seiner Konstitutionsformel nach



ist das Adrenalin ein Methylaminoäthanolbrenzkatechin, das synthetisch durch die Einwirkung von Methylamin auf Chlorazetobrenzkatechin und nachfolgende Reduktion des entstandenen Ketons (Adrenalons) dargestellt werden kann. Das synthetische Adrenalin (Suprarenin) ist ein razemischer Körper, welcher in seine beiden optisch aktiven Komponenten gespalten werden kann. Das im Organismus vorkommende Adrenalin ist linksdrehend und das synthetisch gewonnene l-Suprarenin ist sowohl in physikalischer als auch in physiologischer Hinsicht mit dem natürlichen vollkommen identisch. Das d-Suprarenin bietet in seiner physiologischen Wirkung nach jeder Richtung hin eine stark verkleinerte Kopie des linksdrehenden dar.

Zum chemischen Nachweise des Adrenalins dienen eine Reihe von Farben- und Reduktionsreaktionen, welche auf

einer oxydativen Umsetzung der Substanz beruhen und bis zu einem gewissen Grade auch zur quantitativen Bestimmung Verwendung finden können. Empfindlicher sind die auf manchen charakteristischen physiologischen Wirkungen des Adrenalins (Dilatation der Pupille des enukleierten Froschbulbus, Kontraktion der überlebenden Gefäßwand und Uterusmuskulatur, Erschlaffung der überlebenden Darmmuskulatur) beruhenden biologischen Methoden. Mittels Durchströmung der überlebenden Froschextremitäten kann noch eine Adrenalinmenge von 0,00000125 mg nachgewiesen werden.

Als Muttersubstanzen des Adrenalins im Organismus kommen in erster Reihe die zyklischen Komplexe des Eiweißmoleküls in Betracht.

γ) Wirkungsweise des Adrenalins. Das Adrenalin entfaltet bei intravenöser Injektion schon in minimalsten Dosen (0,0005 bis 0,0001 mg) charakteristische physiologische Wirkungen. Es erzeugt eine hochgradige Steigerung des arteriellen Blutdruckes, welche in erster Linie durch die Erhöhung der peripheren Widerstände infolge der Kontraktion der Gefäße, aber auch durch die Verstärkung der Herztätigkeit bedingt ist. Die überaus mächtige vasokonstringierende Wirkung des Adrenalins bildet die Grundlage für seine ausgedehnte therapeutische Anwendung. Am Herzen erzeugt das Adrenalin eine Beschleunigung und Verstärkung der Kontraktionen, allerdings erst wenn die Hemmungsnerven ausgeschaltet sind. Die glatte Muskulatur des Verdauungskanals, der Harnblase, der inneren Genitalorgane, der Haut, der Bronchien, des Auges usw. werden durch das Adrenalin zum Teil zur Kontraktion, zum Teil zur Erschlaffung gebracht; die Sekretion mancher Drüsen wird gesteigert. Die genauere Analyse der Adrenalinwirkung in den verschiedenen Organen zeigte, daß das Adrenalin nur auf sympathisch innervierte Gewebe einwirkt und daß seine Wirkung identisch ist mit jener, welche man durch elektrische Reizung sympathischer Fasern in den betreffenden Organen erhalten kann. Das Adrenalin wirkt erregend auf sympathische Nerven, gleichgültig ob ihre Funktion Förderung oder Hemmung ist. Es ist eine, elektiv auf das sympathische Nervensystem wirkende Substanz, deren Angriffspunkt in die sympathischen Nervenendigungen oder genauer in die zwischen Nervenendigung und Erfolgsorgan eingeschaltete rezeptive Substanz verlegt werden muß.

Die eigenartige Wirkung des Adrenalins auf den Stoffwechsel, die Steigerung der Konzentration des Zuckers im Blute und die dadurch herbeigeführte Glykosurie kommt gleichfalls durch eine Erregung peripherer sympathischer Nervenendigungen in der Leber zustande, durch welche dieses Organ zur rascheren Sacharifikation des Glykogens und Ausschüttung des Zuckers in die Blutbahn veranlaßt wird. Das Adrenalin wirkt hierbei erregend auf jenen nervösen Regulationsapparat des Kohlehydratstoffwechsels, auf welchen das innere Sekret des Pankreas (siehe Abschnitt 9) einen hemmenden Einfluß ausübt.

In der funktionellen Leistung des Adrenalins gelangt die genetische Verwandtschaft des Adrenalsystems zum sympathischen Nervensystem während des ganzen Lebens andauernd zum Ausdruck. Das Adrenalin ist ein für die normale Funktion des sympathischen Nervensystems anscheinend unerläßlich notwendiges Hormon. Das in dem physiologischen Adrenalingehalt des Blutes sich äußernde ständige Kreisen dieses Hormons bedingt das Zustandekommen des normalen Sympathicustonus und die unter dem Einfluß des sympathischen Nervensystems stehenden Variationen in der Produktion können für die Aenderungen des Erregungszustandes im sympathischen Gebiete verantwortlich gemacht werden.

δ) Hyperadrenalismus. Experimentell wird ein solcher bei jeder Einverleibung des Adrenalins erzeugt. Die Folgen sind jedoch wegen der flüchtigen Wirkung dieser Substanz nur vorübergehend. Im Tierkörper findet eine rasche oxydative Zerstörung des Adrenalins statt, die durch das Blutalkali beschleunigt und durch Säureionen gehemmt wird.

Bei länger fortgesetzter Zufuhr kommen neben den physiologischen auch toxische Wirkungseffekte zustande, vor allem eine Erkrankung der Blutgefäßwand, welche eine ziemlich weitgehende Uebereinstimmung mit der menschlichen Arterosklerose darbietet. Beim Menschen wird in vielen, mit einer andauernden Drucksteigerung und Herzhypertrophie verknüpften Krankheitszuständen (Schrumpfniere, Arteromatose) das Vorhandensein einer Hyperfunktion des Adrenalsystems angenommen und diese Annahme ist durch den Befund adrenalinartiger Substanzen im Blute, sowie durch Sektionsbefunde einer Hyperplasie des chromaffinen Gewebes gestützt.

6b) Interrenalsystem. Bei den Säugetieren und beim Menschen wird der Hauptteil des Interrenalsystems durch die Nebennierenrinde repräsentiert. Ueberdies können Teile der embryonalen Zwischenniere als akzessorische Gebilde (Beizwischennieren) persistieren. In den menschlichen Leichen sind solche sehr häufig, in über 90% der

Fälle, anzutreffen. Morphologisch setzt sich die Nebennierenrinde und in gleicher Weise auch die Beizwischennieren, aus soliden Zellsträngen zusammen, die von Kapillaren und kleinen Venen umsponnen werden und mehr oder weniger deutlich eine Schichtung in 2 bis 3 Zonen aufweisen. Die Rindenzellen sind dadurch charakterisiert, daß ihr Protoplasma mit stark glänzenden, teilweise doppelbrechenden, nach ihren charakteristischen Reaktionen aus Lipoidsubstanzen bestehenden Körnchen mehr oder weniger erfüllt sind. Ueberdies finden sich mit dem Alter zunehmende Pigmentkörnchen vor. Die lipoiden Granula sind als die Sekretionsprodukte des Interrenalsystems zu betrachten; ihre Menge wechselt mit den Aenderungen des Funktionszustandes. Soweit aus den mikroskopischen Reaktionen die chemische Natur dieser Substanzen beurteilt werden kann, handelt es sich einerseits um doppelbrechende Cholesterinester und andererseits bei der in feineren oder gröberen Tropfen auftretenden Fettsubstanz um Cholesterinfettsäuregemische (nicht Ester) oder Phosphatide und Cerebroside neben seifenartigen Verbindungen. Die chemische Untersuchung der Nebennierenrinde ergab gleichfalls das Vorhandensein von Cholesterinester. Eine besondere Bedeutung wurde dem in der Nebenniere in relativ großen Mengen vorkommenden Cholin deswegen zugeschrieben, weil diese Substanz in manchen Richtungen dem Adrenalin gegenüber antagonistisch wirkt. Doch dürfte das Cholin kaum als spezifisches Sekretionsprodukt des Interrenalsystems, vielmehr nur als ein Spaltungsprodukt der in diesem Organ in besonders reichlicher Menge enthaltenen Phosphatide zu betrachten sein.

Ueber die funktionelle Bedeutung des Interrenalsystems ist bisher sehr wenig bekannt. Die Entfernung der Nebennierenrinde, sowie der Interrenalorgane der Selachier ist mit der Fortdauer des Lebens unvereinbar (Biedl), sofern nicht die Beizwischennieren funktionell vikariierend eintreten. An den zurückgebliebenen Resten und ebenso an den akzessorischen Rindenkörperchen sind die Zeichen einer kompensatorischen Hypertrophie wahrnehmbar. Den Funktionsmodus betreffend wird angenommen, daß das Rindensystem eine entgiftende Aktion gegenüber den toxischen Produkten des normalen Stoffwechsels, sowie gegenüber exogenen Giften entfaltet. Bei der nachgewiesenen Bindung und Neutralisation von Giften dürfte in erster Linie der Lipoidgehalt des Organs in Betracht kommen. Es muß ferner die Möglichkeit erwogen werden, daß das Interrenalsystem durch seine Lipoidproduktion die Quelle der Blutlipoide darstellt.

Für die Annahme, daß das Interrenalsystem ein Hormon in die Blutbahn abgibt, welches auf das Körperwachstum, auf die Entwickelung der Keimdrüsen und auf die Pubertätsentfaltung des Organismus einen Einfluß ausübt, liegen einige gesicherte Anhaltspunkte vor. Die Nebennierenrinde des Meerschweinchens weist geradezu einen sekundären Geschlechtscharakter auf und erfährt beim Weibchen durch die Funktion des Genitalapparates zyklische Veränderungen (W. Kolmer). In der Gravidität und nach der Kastration tritt eine Hypertrophie der Nebennierenrinde ein. Beim Menschen sind Fälle von Hypertrophien und Tumoren der Nebennierenrinde mit einer beschleunigten Entwickelung des Körpers und prämaturer Entwickelung der Genitalien verknüpft angetroffen worden.

6c) Die Nebenniere als ganzes Organ. Die Funktion der einheitlichen Nebenniere ist, von der Addisonschen Krankheit des Menschen ausgehend, in erster Linie aus Exstirpationsversuchen erschlossen worden. Die Nebennieren sind lebenswichtige und lebensnotwendige Organe, deren Entfernung in allen Fällen, wo keine akzessorischen Nebennieren vorhanden sind, in kürzester Frist zum Tode führt. Durch eine zur Einheilung gelangende Transplantation des Organs kann der tödliche Ausgang verhindert werden. Die Substitution des Organs durch Zufuhr von Organextrakten erweist sich als erfolglos.

Die Ausfallserscheinungen bei Tieren (zunehmende Apathie, Temperaturabfall, Abmagerung, lähmungsartige Zustände) sind im ganzen wenig charakteristisch. Bemerkenswert ist der nach Entfernung der Nebennieren bei manchen Tieren (Ratte, Hund) nachweisbare Glykogenschwund in der Leber und eine Verringerung der Blutzuckermenge, sowie das Ausbleiben der Glykosurie nach dem Zuckerstich und nach gewissen glykosurisch wirkenden Giften.

Beim Menschen tritt bei chronischer (gewöhnlich durch Tuberkulose bedingter) Destruktion der Nebennieren das von Addison (1855) beschriebene charakteristische Krankheitsbild ein: zunehmende Adynamie mit Störungen von seiten des Digestionstraktes und des Nervensystems, einer eigenartigen bronzefarbigen Pigmentierung der Haut und Schleimhäute, die unter dem Bilde fortschreitender Kachexie zum Tode führt. Ein Teil der Symptome des Morbus Addisonii ist auf eine Funktionsverminderung des Adrenalsystems zu beziehen, so insbesondere der herabgesetzte Blutdruck, die Adynamie, der verminderte Zuckergehalt des Blutes und vielleicht auch die Pigmentierungen, während andere Er-

scheinungen auf den Ausfall des Interrenalsystems zurückgeführt werden müssen.

7. **Hypophyse.** Der Hirnanhang (Hypophysis cerebri) ist ein an der Hirnbasis gelegenes, mit dem Gehirn durch den Trichter in Verbindung stehendes, bei allen Wirbeltieren vorkommendes Organ, an welchem makroskopisch zwei Teile, der drüsige Vorderlappen (Prähypophyse, Glandula pituitaria) und der nervöse Hinterlappen (Neurohypophyse) unterschieden werden können.

Genetisch ist der Vorderlappen ein Abkömmling des Ektoderms; er entwickelt sich aus einer Ausstülpung des Mundhöhlenepithels, der Rathkeschen Hypophysentasche, welche der sich zum Trichter vorstülpenden Basis des Zwischenhirns entgegenwächst, dann sich in Form eines Säckchens abschnürt, doch mit der Mundhöhle durch den bei Selachiern zeitlebens offenbleibenden, bei höheren Wirbeltieren obliterierenden Hypophysengang in Verbindung steht. Aus dem Hypophysengang entwickelt sich die beim Menschen konstant nachgewiesene Rachendachhypophyse. Aus der Vorderwand des Hypophysensäckchens sprossen Zellschläuche, die den drüsigen Vorderlappen bilden. Die hintere Wand des Hypophysensäckchens bildet den die Neurohypophyse bekleidenden Epithelsaum und entwickelt sich zum dritten Bestandteil der Hypophyse, der sogenannten Pars intermedia.

Der Hinterlappen geht aus einer Ausstülpung des III. Hirnventrikels hervor, gelangt mit dem Hypophysensäckchen in Verbindung, bewahrt bei manchen Tierarten seine zentrale Höhle und steht durch den Hypophysenstiel mit dem Gehirn in Zusammenhang.

Morphologisch besteht die Neurohypophyse aus Gliazellen und Gliafasern, in welche ein eigenartiges Pigment eingebettet ist. Die Bekleidung des zentralen Hohlraumes bilden Ependymzellen. Der Hypophysenvorderlappen ist aus Strängen und Schläuchen von hochdifferenzierten epithelialen Zellen aufgebaut, welche von reichlichen weiten kapillaren Blutgefäßen umgeben sind. Die Zellen können nach ihren zytologischen Merkmalen als chromophobe Hauptzellen, eosinophile und basophile Zellen unterschieden werden. In der Gravidität entwickelt sich auf Kosten der Hauptzellen eine neue Zellart, die Schwangerschaftszellen, in großer Zahl (Erdheim und Stumme). Bei kastrierten Tieren sind eigenartige große blasige Zellen anzutreffen. Dem histologischen Bilde nach kann der Hypophysenvorderlappen als sezernierendes Organ angesprochen werden. Einen strukturell eigenartigen Anteil der Hypophyse bildet die Pars intermedia, welche die embryonale Hypophysenhöhle begrenzt und bei vielen Tierarten die epitheliale Bekleidung der Neurohypophyse bildet und sich als solche auf den Hypophysenstiel hinauferstreckt. Beim Menschen ist eine solche intermediäre Zone nur beim Neugeborenen vorhanden, während beim Erwachsenen das gleiche Gewebe in den Hinterlappen eingewandert anzutreffen ist. Die Pars intermedia besteht aus verschieden breiten, reichlich vaskularisierten Lagen von epithelialen, feingranulierten Zellen, welche vielfach in Form von Bläschen angeordnet sind, deren Inneres eine Kolloidmasse enthält. Kleine Kolloidkörperchen findet man im interepithelialen Zwischengewebe, sowie in den Spalten des Gliagewebes im Hinterlappen und dem Hypophysenstiel entlang. Dieses als Sekretionsprodukt der Pars intermedia zu betrachtende Kolloid gelangt in den III. Hirnventrikel (Herring). Bei thyreopriven Tieren ist eine Hypertrophie der intermediären Zone mit überaus reichlicher Kolloidansammlung im Hypophysenstiel zu beobachten.

Die funktionelle Bedeutung der Hypophyse erhellt aus der eigenartigen Wirkung der Hypophysenextrakte, aus den in neuester Zeit mit Erfolg ausgeführten Exstirpationsversuchen an Tieren und aus den Erfahrungen von gesteigerter und herabgesetzter Tätigkeit des Organs in pathologischen Fällen beim Menschen.

α) Wirkung der Hypophysenextrakte. Die intravenöse Injektion eines aus Hypophysengewebe gewonnenen Extraktes bewirkt eine rasch einsetzende hochgradige Steigerung des arteriellen Blutdrucks, welche sich von der Adrenalinwirkung durch die geringere Intensität und längere Dauer unterscheidet. Auffallend und geradezu charakteristisch ist es, daß bei einer nach kurzer Zeit wiederholten Injektion desselben Extraktes die Drucksteigerung ausbleibt, ja sogar eine Drucksenkung eintritt, die auf das Vorhandensein einer zweiten alkohollöslichen depressorisch wirkenden Substanz bezogen wird. Die Blutdrucksteigerung kommt in erster Reihe durch eine periphere Gefäßverengerung zustande, doch wird auch die Herztätigkeit im Sinne einer Verstärkung und Verlangsamung der Herzschläge beeinflußt. Sowohl die Herz- als auch die Gefäßwirkung beruht nicht wie beim Adrenalin auf Erregung peripherer Nervenendigungen, sondern auf der direkten Beeinflussung der glatten Muskelfasern. Die gleiche direkte Muskelwirkung des Hypophysenextraktes kann auch an anderen Organen mit glatter Muskulatur (Darm, Harnblase, Uterus), zugleich aber auch eine Erregbarkeitserhöhung in den autonomen und sympathischen Nerven-

endigungen dieser Organe konstatiert werden. Die Wirkung auf den Uterus bildet die Grundlage der ausgedehnten Verwendung des Hypophysenextraktes in der Geburtshilfe und Gynäkologie.

Ein zweiter charakteristischer Effekt der Hypophysenextrakte ist die bei allen Applikationsarten eintretende hochgradige Steigerung der Diurese, welche auf einer spezifischen Erweiterung der Nierengefäße und gleichzeitigen Erregung der sekretorischen Drüsenzellen beruht. Endlich bewirkt das Hypophysenextrakt eine Veränderung des Kohlehydratstoffwechsels im Sinne einer Herabsetzung der Assimilationsgrenze für Zucker und erzeugt in größeren Dosen auch eine Glykosurie.

Ueber die chemische Natur der im Hypophysenextrakte enthaltenen physiologisch wirkenden Substanzen ist bisher nichts Genaues bekannt, wohl aber ist die für die Auffassung der Funktion des Organs wichtige Frage, in welchem Abschnitte diese Substanzen enthalten sind, durch die Untersuchungen in der neuesten Zeit dahin entschieden worden, daß sie aus der Pars intermedia stammen, dort produziert und in den Liquor cerebrospinalis abgegeben werden. Die Wirkung der Extrakte des Hinterlappens ist nur auf die Einlagerung von intermediärem Gewebe und das Vorhandensein von Kolloidtröpfchen zurückzuführen. Extrakte des Vorderlappens sind wirkungslos, doch scheint die länger dauernde Fütterung junger Tiere mit Vorderlappensubstanz das Wachstum zu begünstigen (E. A. Schäfer).

β) Exstirpationsversuche. Die vollständige Entfernung der Hypophyse ist mit längerer Fortdauer des Lebens unvereinbar. Auch die nach völlig einwandfreien Methoden operierten Tiere gehen schon nach kurzer Zeit, ohne charakteristische Symptome darzubieten, zugrunde. Nach unvollständiger Exstirpation kann der tödliche Ausgang ausbleiben und es kommt, insbesondere bei jugendlichen Tieren, zu auffälligen Erscheinungen und charakteristischen anatomischen Veränderungen. Die operierten Tiere bleiben im Wachstum zurück, unter Offenbleiben der Epiphysenfugen behält das Skelett seine kindlichen Proportionen, die Knochen bleiben zart und unterliegen leicht Verkrümmungen, so daß die Tiere nicht bloß zwerghaft klein, sondern auch mißgestaltet erscheinen. Sie behalten auch im übrigen ihren infantilen Habitus (Wollhaare, Milchzähne), bleiben in der psychischen Entwickelung zurück und zeigen zugleich eine besonders auffällige Vermehrung der Fettablagerung im Unterhautzellgewebe, eine mehr oder minder ausgesprochene Fettsucht. Besonders eingreifend ist der Einfluß der Hypophysenentfernung auf die Geschlechtsreife; diese wird in hohem Grade gehemmt, die äußeren Genitalorgane bewahren ihren kindlichen Typus, die Keimdrüsen bleiben in der Größe und in ihrer Differenzierung stark zurück. Die Spermatogenese tritt verspätet auf, die Eibildung verharrt auf dem Stadium des Primitivfollikels. Eine hochgradige Atrophie des gesamten Genitalapparates und zugleich eine auffallende Anhäufung von Fett im subkutanen Gewebe und im großen Netz sind auch bei erwachsenen hypophysektomierten Tieren zu konstatieren. Im Stoffwechsel zeigt sich eine beträchtliche Herabsetzung des Sauerstoffverbrauches und eine starke Herabsetzung des Eiweißumsatzes (Aschner und Porges). Im Kohlehydratstoffwechsel tritt beim hypophysektomierten Tiere eine charakteristische Störung durch die auffällige Erhöhung der Toleranz für Zucker auf, welche durch Einverleibung von Hypophysenextrakt vermindert und selbst unter die Norm herabgedrückt werden kann (Cushing, Goetsch und Jacobson).

Für das Zustandekommen des geschilderten Symptomenkomplexes ist die Entfernung des Hinterlappens völlig belanglos. Es kann nur der Wegfall oder eine Einschränkung der Funktion des Vorderlappens und der Pars intermedia verantwortlich gemacht werden, und zwar beruht die Wachstumsstörung auf dem Wegfall des Vorderlappens, die Stoffwechselstörung und wahrscheinlich auch die Hemmung der Sexualentwickelung auf einer Verminderung des intermediären Gewebes.

γ) Hypophysenerkrankungen beim Menschen. Das Krankheitsbild der Akromegalie, das neben den Symptomen eines wachsenden Hirntumors durch ein Größerwerden der gipfelnden (akralen) Teile des Körpers (Nase, Lippen, Zungen, Hände und Füße), durch hyperplastische Veränderungen der Knochen und frühzeitige Störungen in der Funktion der Keimdrüsen charakterisiert ist, zeigt als typischen Sektionsbefund eine durch Adenombildung bedingte Vergrößerung der Hypophyse, und ist zweifellos durch eine Funktionssteigerung des drüsigen Vorderlappens bedingt. Beweisend für diese Genese sind die glänzenden Heilerfolge, welche durch die operative Entfernung des Hypophysentumors erzielt werden konnten.

Eine, zumeist gleichfalls auf Adenombildung beruhende Vergrößerung der Hypophyse bildet ferner ein typisches Vorkommnis bei dem Riesenwuchs (Gigantismus), einer gewöhnlich während der Pubertätsentwickelung einsetzenden Anomalie des Knochenwachstums, welche zu einer die

mittleren Dimensionen der Rasse übersteigenden Körperlänge führt und mit einem Zurückbleiben in der Genitalentwickelung verknüpft ist. Der größte Teil der genau untersuchten Riesen zeigte zugleich mehr oder minder ausgesprochene Symptome der Akromegalie oder ist später akromegal geworden. Der Gigantismus ist die Akromegalie der Wachstumsperiode und die Akromegalie ist der Riesenwuchs nach beendigtem Wachstum (Brissaud). Neben der gesteigerten Hypophysentätigkeit kann allerdings auch eine primäre hypoplastische Entwickelung der Keimdrüsen beim Zustandekommen gewisser Formen des Riesenwuchses (infantiler oder eunuchoider Gigantismus) in Betracht gezogen werden.

Eine verminderte Tätigkeit des Hypophysenvorderlappens infolge ungenügender Entwickelung oder pathologischer Destruktion dieses Organteiles dürfte in der Pathogenese mancher Formen des Zwergwuchses (Mikromelie, Chondrodystrophie) eine Rolle spielen.

Das in neuerer Zeit beschriebene Krankheitsbild der hypophysären Fettsucht oder Dystrophia adiposogenitalis (A. Fröhlich), bei welchem neben den Symptomen eines Hypophysentumors eine rasch sich entwickelnde Fettsucht, Hypoplasie der Keimdrüsen und infantiler Gesamthabitus besteht, ist wohl angesichts der Erfahrungen bei den Exstirpationsversuchen an Tieren auf eine verminderte Hypophysentätigkeit zu beziehen. Es dürfte sich hierbei um eine durch mechanische Momente (Druck des Tumors) bedingte Einschränkung in der Abgabe des Sekretes der Pars intermedia handeln. Andererseits führt eine vermehrte Sekretabgabe aus diesem Organteile (im Tierexperiment durch mechanische Insulte erzeugbar) zu einer anhaltenden Vermehrung der Harnsekretion und wäre bei manchen Formen von Diabetes insipidus des Menschen als ursächliches Moment in Betracht zu ziehen.

δ) Zusammenfassung. Aus dem gesamten über die Hypophyse vorliegenden Tatsachenmaterial gelangen wir zu folgender Auffassung der Hypophysenfunktion: Die Hypophyse enthält zwei Abschnitte, welchen vom morphologischen Standpunkt aus eine sekretorische Tätigkeit zugeschrieben werden kann, das sind Vorderlappen und Pars intermedia; der Hinterlappen ist strukturell indifferent. Der Vorderlappen gibt ein Hormon anscheinend direkt in die Blutbahn ab, welches die Entwickelung des Körpers, der Keimdrüsen und in erster Linie das Wachstum der Knochen, der Knorpel und des Bindegewebes beeinflußt. Die Pars intermedia produziert eine kolloidartige Substanz, welche anscheinend auf dem Wege des Hypophysenstiels direkt in die Hirnhöhle gelangt und eigenartige Wirkungen auf die glatte Muskulatur der Gefäße des Darmes, der Harnblase und des Uterus, sowie einen diuretischen Effekt entfaltet.

8. Zirbeldrüse. Die aus einer Ausstülpung der Decke des embryonalen Zwischenhirns entstandene, zwischen dem vorderen Vierhügelpaar gelegene Zirbeldrüse (Glandula pinealis; Epiphyse) wird auf Grund der bei pathologischen Befunden am Menschen gesammelten Erfahrungen, die durch neuestens gewonnene experimentelle Ergebnisse (C. Foà) gestützt werden, zu jenen Organen gerechnet, welche durch ihre innere Sekretion auf die somatische und psychische Entwickelung des Individuums und auf den Ernährungszustand des Körpers und einzelner Gewebe einen nachweisbaren Einfluß ausüben.

9. Pankreas. Die Bauchspeicheldrüse gehört zu jenen Organen, welche neben ihrer äußeren Sekretion auch eine innersekretorische Leistung vollziehen. Das in den Darm sich ergießende äußere Sekret, der Pankreassaft, dient zum Abbau der Nahrungsstoffe und zur Vorbereitung derselben zur Resorption. Mit seiner inneren Sekretion spielt das Pankreas im Kohlehydratstoffwechsel eine dominierende Rolle. Der Nachweis der letzteren ist in erster Reihe durch die Ausfallserscheinungen nach Exstirpation des Organs, durch den sogenannten Pankreasdiabetes (v. Mering und Minkowski 1889) erbracht worden. Bei allen untersuchten Tierarten führt die totale Entfernung der Bauchspeicheldrüse zu einer dauernden Zuckerausscheidung im Harn, sowie zu Symptomen, wie sie vom schweren, zum Tode führenden Diabetes mellitus des Menschen her bekannt sind. Für das Zustandekommen dieser Stoffwechselstörung sind weder die bei der Operation gesetzten Gefäß- und Nervenläsionen, noch auch der Wegfall der äußeren Sekretion des Organs verantwortlich zu machen. Das Fehlen des pankreatischen Saftes im Darm nach Unterbindung der Ausführungsgänge oder nach Verlagerung des Organs unter die Haut hat keine Glykosurie zur Folge. Die Durchtrennung des Gefäßstieles des verlagerten Pankreasstückes bedingt nur eine vorübergehende Zuckerausscheidung und erst die Exstirpation dieses Drüsenrestes führt zum schweren tödlichen Diabetes. Man kann einen großen Teil des Pankreas entfernen, wenn der zurückbleibende Anteil nur genügend vaskularisiert und ernährt ist, wird man doch die dauernde Glykosurie vermissen. Ist der zurückgelassene Rest nur sehr klein, so beobachtet man einen sogenannten „leichten Diabetes", wobei nur nach Kohlehydrat-

zufuhr Zucker im Harn erscheint, der bei Fleischnahrung wieder verschwindet.

Das Wesen der Stoffwechselstörung beim Pankreasdiabetes besteht in einer Hyperglykämie, welche die unmittelbare Ursache der Zuckerausscheidung darstellt, in einem Verschwinden des Reserveglykogens und in einem besonderen Verhalten des Organismus gegenüber verschiedenen Kohlehydraten, endlich in einer Steigerung der gesamten Oxydationsprozesse, welche eine rasche Verbrennung des Fettes, Einschmelzen des Eiweißbestandes und dadurch Abmagerung des Körpers zur Folge hat.

Die im Mittelpunkt stehende Abänderung des Kohlehydratstoffwechsels könnte durch eine Verminderung des Zuckerverbrauches oder durch eine Vermehrung der Zuckerbildung erklärt werden. Für die Annahme, daß das Pankreas einen für den Zuckerverbrauch notwendigen, etwa die Glykolyse fördernden Stoff liefere, konnten trotz vielfacher Bemühungen hinreichende Beweise nicht beigebracht werden. In letzter Zeit konnte Starling zeigen, daß das überlebende Herz des pankreasdiabetischen Hundes keinen Zucker zu assimilieren vermag. Als sichergestellt kann gelten, daß das Pankreas ein Hormon produziert, welches auf den die Zuckerbildung in der Leber regulierenden nervösen Apparat einen hemmenden Einfluß ausübt. Nach der Exstirpation des Pankreas fehlt durch den Wegfall dieses Hormons die normale Hemmung der Zuckerbildung. Es kommt zu einer Ausschüttung des vorhandenen und zu einem raschen Abbau des neugebildeten Glykogens und damit zur Hyperglykämie. Das Pankreashormon wirkt anscheinend auf denselben nervösen Apparat hemmend ein, welchen das Adrenalin erregt. Auf den Vorgang der Zuckerbildung üben übrigens noch andere Hormone (Schilddrüse, Pars intermedia der Hypophyse, Keimdrüsen) einen modifizierenden Einfluß aus.

Die chemische Natur des auf dem Wege der Lymphbahnen und des Ductus thoracicus in die Blutbahn gelangenden inneren Sekretes des Pankreas ist nicht näher bekannt. Als Produktionsstätte des Pankreashormons können die in das Drüsengewebe eingestreuten, aus eigenartigen Zellen bestehenden Langerhansschen Inseln angesprochen werden, wenn es auch nicht an Stimmen fehlt, welche beiden epithelialen Geweben des Pankreas, sowohl den Acinis als auch den Inseln eine Funktion bei der Bereitung des inneren Sekretes zuschreiben. Nach den pathologisch-anatomischen Befunden beim menschlichen Diabetes kommt den Inseln eine ausschlaggebende pathogenetische Bedeutung zu. Man fand hierbei Degenerationen, Sklerosen, Atrophie und insbesondere eine starke Abnahme der Zahl der funktionstüchtigen Inseln.

10. Magen- und Darmschleimhaut. In der Schleimhaut des Magens und des Dünndarmes sind Hormone vorhanden, welchen keine allgemeine Wirkungen auf den Gesamtorganismus zukommt, sondern die nur lokale Reizstoffe für die Sekretion und vielleicht auch die Motilität des Verdauungsapparates darstellen. Aus der Pylorusschleimhaut kann durch Extraktion mit Salzsäure eine Substanz, das Magensekretin oder Gastrin, gewonnen werden, welche in kleinen Dosen injiziert die Magensaftsekretion anregt. In gleicher Weise gibt die Salzsäurebehandlung der Duodenalschleimhaut ein Extrakt, mit einer anregenden Wirkung auf die Sekretion des Pankreassaftes, die Absonderung von Galle und Darmsaft, das Sekretin.

Die Absonderung der Fermente des Verdauungskanals dürfte demnach auf zweifache Weise zustandekommen. Die Magensaftsekretion wird durch den Anreiz der Geschmacksempfindung einerseits auf nervösem Wege ausgelöst, andererseits durch das aus den Pylorusdrüsen stammende Magensekretin auf dem Blutwege gesteigert. Bei der Absonderung der drei im oberen Dünndarm zusammenwirkenden Säfte der Galle, des Pankreas und Darmsaftes, verlaufen gleichfalls zwei Vorgänge nebeneinander. Durch den Uebertritt des sauren Mageninhalts wird ein Reiz auf die Nervenendigungen ausgeübt, welcher reflektorisch zur Sekretion führt. Gleichzeitig entsteht aus der in der Darmschleimhaut vorhandenen Vorstufe das Sekretin und gelangt auf dem Blutwege zu den Drüsen, um sie zu einer vermehrten Tätigkeit anzuregen.

Aus der Magendarmschleimhaut sowie aus der Milz kann eine Substanz, das Hormonal (Zuelzer), gewonnen werden, der die Fähigkeit zukommt, die Darmperistaltik anzuregen. Die eigenartige Wirkung des Sekretins sowie des Hormonals wird ihrem Gehalt an Cholin und Abbauprodukten der Eiweißkörper zugeschrieben.

11. Keimdrüsen. Aus den Beobachtungen über den Parallelismus in der Entwickelung der Geschlechtsdrüsen und der sekundären Geschlechtsmerkmale und aus den vielfachen Erfahrungen bei der Kastration von Menschen und Tieren ist das Abhängigkeitsverhältnis zahlreicher Organe und Gewebe, sowie des Stoffwechsels von den Keimdrüsen schon lange bekannt und wurde zunächst als nervöse Korrelation aufgefaßt. Mit dem von Brown-Séquard erbrachten Nachweise, daß in dem Extrakte der Keimdrüsen physiologisch wirkende Stoffe ent-

halten sind und mit den weiteren Fortschritten in der Lehre von der inneren Sekretion ist dann der formative und funktionelle Einfluß der Keimdrüsen auf entfernte Teile als chemische Korrelation erkannt worden.

Der essentielle Unterschied zwischen den Geschlechtern, soweit er die Keimdrüsen (Gonaden) betrifft, ist nach neueren Untersuchungen entweder von der Gamete an bestimmt (progam) oder wird bei der Vereinigung der Gameten während der Befruchtung (syngam) entschieden. Der sexuelle Dimorphismus ist aber in der Dimorphie der Generationszellen nicht erschöpft, sondern erstreckt sich auch auf andere körperliche Zeichen. Zunächst bestehen wesentliche Unterschiede bei den Geschlechtern in bezug auf die Ausführungsgänge der Keimdrüsen und die äußeren Geschlechtsteile, also in bezug auf jene Organe, welche man als Hilfsapparate des Genitales bezeichnen kann. Außer diesen essentiellen und genitalen subsidiären Unterschieden, den sogenannten primären Sexualmerkmalen, gibt es noch andere, das Geschlecht charakterisierende Zeichen, welche mit der Fortpflanzung in keiner direkten Beziehung stehen, die sogenannten sekundären (extragenitale, interne und externe) Sexualmerkmale (Unterschiede in der Größe, Bedeckung des Körpers, in vielfachen somatischen und psychischen Merkmalen). Von mancher Seite werden nicht nur die die Generationszellen betreffenden, sondern auch die in allen Organen und Geweben, also in den Somazellen sich manifestierenden Sexualdifferenzen auf eine sexualdifferenzierte Anlage zurückgeführt (Somageschlecht). Die Geschlechtsmerkmale werden als Speziesmerkmale betrachtet, welche unabhängig von den Keimdrüsen entstanden und erworben worden sind (Tandler). „Die Keimzellen sind an der Erzeugung der Geschlechtsunterschiede nur indirekt beteiligt, insofern, als sie ihren Trägern, dem Soma, zunächst eine andere Tätigkeit aufoktroyieren, ein in fast allen Teilen funktionell verschiedenes Individuum aus ihm machen und erst diese abweichenden Funktionen erzeugen unmittelbar am Körper die ihnen zusagenden Bildungen" (Kammerer). Auch bei dieser Annahme muß aber zugegeben werden, daß die dem Geschlecht entsprechende Modifikation der Speziesmerkmale an den Besitz einer sexuell differenzierten Keimdrüse geknüpft ist und die volle Ausbildung der Geschlechtscharaktere nur unter dem Einfluß der entsprechenden Keimdrüse zustandekommen kann. Beweisend hierfür sind die Erfahrungen, welche man über die Folgen der Kastration bei Tieren und beim Menschen sammeln konnte.

α) Kastration. Die Keimdrüsen im Embryonalleben zu einer Zeit auszuschalten, ehe noch der Einfluß auf die erste Anlage der Sexualcharaktere zur Geltung gelangt, ist wohl nicht möglich. Diesem Postulate nähert sich am meisten noch das von der Natur ausgeführte Experiment der parasitären Kastration, welche bei den Krabben am eingehendsten studiert wurde (Giard, Smith, Potts). Es zeigte sich, daß die Zerstörung der Gonaden durch frühzeitig einwandernde Schmarotzer bei Krabbenmännchen eine derartige Umänderung des Geschlechtscharakters herbeiführen kann, daß sie nach einigen Mauserungen in ihrem gesamten Habitus und auch in ihren Instinkten vollständig den weiblichen Typus annehmen können. Mit Rücksicht darauf, daß die eingewanderten Parasiten nur Weibchen sind, welche im Wirte geschlechtsreif werden, ist die Annahme, daß hier die weibliche Keimdrüse des Schmarotzers auf die Entwickelung des Sexualcharakters des Wirtes bestimmend eingewirkt hat, nicht von der Hand zu weisen.

Besonders bemerkenswert ist, daß die bisher ausgeführten Kastrationsversuche bei den Insekten durchwegs negative Resultate ergeben haben. Die an ganz jungen Raupen ausgeführte Kastration änderte nichts an den ausgesprochenen Sexualmerkmalen der entwickelten Schmetterlinge (Meisenheimer und Kopeć).

Bei den Wirbeltieren und beim Menschen bedingt die frühzeitige, vor der Geschlechtsreife ausgeführte Kastration zunächst eine mangelhafte Weiterentwickelung des Genitalapparates. Bei männlichen Kastraten bleiben die Samenblasen, die Prostata und der Penis klein. Der Geschlechtstrieb bleibt bei den Kastraten erhalten, die Brunst schwindet im allgemeinen; bei männlichen Ratten-Frühkastraten ist zuweilen eine schwache heterosexuelle Neigung zu konstatieren (Steinach). Bei männlichen Kastraten ist zuweilen eine abnorme, gewöhnlich allerdings durch Fettanhäufung bedingte Vergrößerung der Brustdrüse (Gynäkomastie) anzutreffen.

Beim menschlichen Weibe wird die Kastration nur in geschlechtsreifem Alter, fast niemals dagegen bei Kindern ausgeführt und hat ein Aufhören der Menstruation und der mit der Menstruation verknüpften periodischen Schwankungen in verschiedenen Funktionen (Temperatur, Puls, Stoffwechsel usw.) sowie gewisse krankhafte Ausfallserscheinungen zur Folge. Auch bei älteren kastrierten Frauen sind regressive Veränderungen an den Genitalien, Schrumpfung und Atrophie des Uterus und der Vagina nachzuweisen. An weiblichen Tieren hat die frühzeitig ausgeführte Kastration eine Ent-

wickelungshemmung des Genitalapparates und der Brustdrüsen, die spätere eine Atrophie des Uterus, Aufhören der Brunst und der menstruationsähnlichen Blutungen zur Folge. Die Entfernung des Ovariums kurze Zeit nach der Befruchtung verhindert die Nidation des Eies.

Was die mit der Fortpflanzung nicht im Zusammenhang stehenden sekundären Geschlechtsmerkmale betrifft, so zeigt es sich, daß sie nach einer präpuberalen Kastration im allgemeinen nur mangelhaft zur Entwickelung gelangen. Ein Umschlagen in den heterosexuellen Typus findet beim Menschen niemals statt. Der männliche Kastrat zeigt eine spärliche Behaarung des Körpers, mangelhafte Bartentwickelung; der Kehlkopf sowie die Stimme bewahrt ihren kindlichen Charakter, am Skelett ist ein deutliches männliches Geschlechtszeichen, die Ausbildung des Margo supraciliaris anzutreffen, das Becken hat keinen femininen, sondern infantilen Charakter. Nur der mitunter auffällig gleichmäßige Fettansatz verleiht dem Eunuchen manchmal einen weiblichen Habitus. Auch die Beeinflussung der Psyche im Sinne einer Umänderung in den andersgeschlechtlichen Typus gehört keineswegs zu den Konsequenzen der Kastration, wenn auch das ruhige phlegmatische Temperament der verschnittenen Menschen auffällig ist. Beim menschlichen Weibe kommt es infolge von pathologischen Prozessen an den Keimdrüsen und ebenso beim physiologischen Sistieren der Keimdrüsentätigkeit zu einem mehr oder minder vollständigen Schwund einzelner ausgeprägter Merkmale des Geschlechts und zum Auftreten heterosexueller Zeichen (viriler Charakter, tiefe männliche Stimme, mehr oder minder starke Bart- und Haarentwickelung des Körpers).

Die frühkastrierten Tiere zeigen eine mangelhafte Ausbildung der sekundären Sexusmerkmale (Fehlen der Brunstschwielen beim Frosch, mangelhafte Entwickelung des Kammes und der Bartläppchen beim kastrierten Hahn, kleineres Gehörn bei kastrierten Schafen und Ziegenböcken). Ein Umschlagen in den heterosexuellen Typus findet aber auch hier nie statt. Ein kastrierter Hahn wird in seinem Habitus niemals der Henne, ein kastrierter Stier niemals der Kuh ähnlich.

Die Kastration beeinflußt nicht nur die Ausbildung der sekundären somatischen Sexuszeichen, sondern übt auch auf eine Reihe von Organen und Geweben sowie auf den gesamten Stoffwechsel einen mächtigen Einfluß aus. Die Beeinflussung des Knochenwachstums äußert sich in einer Verzögerung der Verknöcherung der Epiphysenknorpel und dadurch bedingten Verstärkung des Längenwachstums über das Durchschnittsmaß. Da das gesteigerte Längenwachstum speziell die Extremitäten betrifft, entsteht beim menschlichen Frühkastraten, bei Individuen mit Hypoplasie des Genitales, den Eunuchoiden (Tandler), und endlich ebenso in allen Fällen von Spätreife der Keimdrüsen, Hochbeinigkeit, während eine sexuelle Frühreife (wie bei weiblichen Individuen und manchen Rassen) mit Kurzbeinigkeit einhergeht. Die Kastration ist ferner von Veränderungen in manchen innersekretorischen Organen begleitet, die ihrerseits gleichfalls das Knochenwachstum beeinflussen (Kleinerbleiben der Schilddrüse, Hyperplasie der Thymus und insbesondere eine Größenzunahme der Hypophyse, welche auf einer Hypertrophie und dem Auftreten neuartiger Zellelemente im Vorderlappen beruht). Beim Offenbleiben der Epiphysenfugen infolge der Kastration ist vielleicht das tatsächliche Wachstum der gesteigerten Hypophysentätigkeit zuzuschreiben. Die Kastration bedingt ferner Erscheinungen in vielen Gebieten (Haut, Haare, Zähne, Muskel- und Nervensystem), welche dem physiologischen Altern entsprechen. Am bedeutsamsten ist der Einfluß der Kastration auf den allgemeinen Stoffwechsel. Sie führt zu einem gesteigerten Fettansatz; diese Beobachtung war anscheinend die Basis für die Verwendung des Verschneidens bei Tieren zu Mastzwecken. Die Ursache des abnormen Fettansatzes beruht auf einer, durch eine starke Abnahme des Sauerstoffverbrauches nachweisbaren Verringerung der Oxydationsprozesse.

β) Substitution. Daß die Entfernung der Keimdrüsen für den Organismus den Wegfall eines Hormonorganes bedeutet, welches durch das Produkt seiner inneren Sekretion entfernte Teile beeinflußt, erscheint dadurch bewiesen, daß die Folgen der Kastration durch die Wiedereinverleibung der Keimdrüsen behoben werden können. Die subkutane oder stomachale Einverleibung von Ovarial- oder Hodensubstanz kann den nach der Kastration gesunkenen Stoffwechsel nicht nur zur Norm, sondern sogar um 30 bis 50% darüber heben, kann einen Stillstand des gesteigerten Knochenwachstums, einen Rückgang der Hypophysenhypertrophie herbeiführen. Hodenextrakte (Liquide testiculaire) bewirken eine Zunahme der muskulären Leistungsfähigkeit. Auch die durch die Kastration geschädigten Geschlechtsmerkmale werden durch die Keimdrüsenstoffe in günstigem Sinne beeinflußt. Hodenstücke, welche in den Lymphsack kastrierter Frösche eingebracht, dort nicht einheilen, sondern resorbiert werden, bedingen eine Hypertrophie der Brunstorgane und das Auftreten des Umklammerungs-

reflexes. Ein ähnlicher quantitativ geringerer Erfolg kann auch mit Ovarien erzielt werden. Injektion von Hodensubstanz verhindert den Prostataschwund bei kastrierten Hunden. Ovarienextrakte verhindern die Kastrationsatrophie des Uterus, erzeugen bei nicht brünstigen Tieren Erscheinungen der Brunst. Extrakte aus der Plazenta bewirken eine Hypertrophie des Uterus und der Vagina, wirken anregend auf die Milchsekretion. Durch wiederholte Einverleibung von Extrakten aus Embryonen kann bei jungfräulichen Tieren ein beträchtliches Wachstum der Brustdrüse erzielt werden. Die Verfütterung von Ovarialsubstanz kann die im physiologischen Klimakterium, sowie die nach Exstirpation der Ovarien auftretenden Ausfallserscheinungen günstig beeinflussen.

Die Transplantation der männlichen Keimdrüsen ist bisher nur in der Weise gelungen, daß die eigenen Hoden oder Stücke derselben, an einen anderen Ort gebracht dort zur Einheilung gelangt sind. Vollständig kastrierte Hähne mit transplantiertem funktionierenden Hodengewebe zeigten keinen vollständigen Kapaunaber auch keinen vollständigen Hahncharakter. Kastrierte junge Ratten erlangten, wenn die implantierten Hoden eingeheilt sind, ihre volle Männlichkeit. Die Transplantation der Ovarien gelingt viel besser, ja sogar mit Ovarien einer anderen Spezies. Durch eine Einheilung des Pfröpflings wird die Kastrationsatrophie des Genitales verhindert. Beim kastrierten Affenweibchen treten die menstruationsähnlichen Blutungen wieder auf. Es ist sogar sowohl im Tierversuch wie beim Menschen zu einer Eireifung und zur Gravidität gekommen.

Ein Austausch der Keimdrüsen zwischen Männchen und Weibchen konnte in letzter Zeit ebenfalls mit Erfolg durchführen. Bei jungen männlichen Ratten, denen die Hoden entfernt und Ovarien oder Uterus und Eileiter implantiert wurden, entwickelten sich die letzteren weiter, die Brustdrüsen bildeten sich bis zu einem Grade aus wie beim jungfräulichen Weibchen, die Dimensionen des Körpers, das Haarkleid, der Fettansatz glichen jenen eines Weibchens, und solche feminierte Männchen wurden von normalen Männchen als Weibchen agnosziert und behandelt (Steinach).

γ) Innersekretorische Gewebselemente der Keimdrüsen. Im Hoden vollführen die germinativen Anteile, die Samenkanälchen, die äußere Sekretion der Spermabereitung, während als innersekretorisches Gewebe die Leydigschen Zwischenzellen zu betrachten sind. Hierfür spricht 1. das der sexuellen Differenzierung entsprechende Verhalten dieses interstitiellen Gewebes in verschiedenen Lebensperioden und die den oestrischen Zyklen entsprechenden Entwickelungs- und Rückbildungsvorgänge in der Zwischensubstanz; 2. kann auf experimentellem Wege gezeigt werden, daß die Unterbindung der Ausführungsgänge, sowie die Röntgenbestrahlung des Hodens, wobei nur die samenbildenden Anteile geschädigt werden, das interstitielle Gewebe hingegen intakt bleibt, keine Kastrationsfolgen, insbesondere keine Veränderungen an den sekundären Sexualcharakteren nach sich zieht. Die Erfahrungen beim Kryptorchismus des Menschen und der Tiere bestätigten dies. Soweit in den kryptorchen Hoden nur die generativen Anteile verkümmert, das interstitielle Gewebe hingegen gut entwickelt ist, zeigen ihre Träger alle Merkmale der Männlichkeit.

Bei den weiblichen Keimdrüsen ist die Frage, ob der Follikelapparat, das Corpus luteum, oder die sogenannte interstitielle Drüse als das innersekretorische Gewebe zu betrachten ist, noch nicht mit Sicherheit entschieden. Für die endokrine Funktion des Corpus luteum wird insbesondere angeführt, daß nach isolierter Exstirpation desselben die Nidation des befruchteten Eies und die deziduale Reaktion der Uterusschleimhaut ausbleibt. Das interstitielle Gewebe im Ovar weist die histologischen Merkmale einer innersekretorischen Drüse auf und dürfte in erster Linie neben den sekundären Merkmalen die Ausbildung der generativen Anteile der Keimdrüsen beeinflussen und vielleicht auch die Funktion des gelben Körpers ersetzen und übernehmen können.

δ) Zusammenfassung. Die Keimdrüsen, welche durch ihre generativen Anteile die Erhaltung der Art ermöglichen, erfüllen mit ihren innersekretorischen Anteilen wichtige Funktionen im individuellen Leben. Die von ihnen produzierten Hormone sind für die volle Ausbildung und die funktionellen Leistungen des Genitalapparates, weiterhin aber auch zur vollständigen Ausgestaltung der sogenannten sekundären Geschlechtsmerkmale unerläßlich notwendig. Sie üben aber auch in anderer Richtung auf den Gesamtorganismus einen wichtigen morphogenetischen und funktionellen Einfluß aus. Auch hier, wie bei manchen anderen innersekretorischen Organen bedarf noch die Frage, ob die Hormonwirkung den Organchemismus direkt oder erst indirekt unter Vermittelung des Nervensystems beeinflußt, einer näheren Prüfung.

Literatur. *Zusammenfassende, das ganze Gebiet behandelnde Arbeiten:* **A. Biedl,** *Innere Sekretion. Wien-Berlin 1910. 2. Aufl. ebenda 1913. Auch englisch, London 1912.* — **Biedl-Morawitz,** *Innere Sekretion. Referate f. d. 83. Versammlung d. Ges. deutscher Naturforscher und Aerzte. Karlsruhe 1911.* —

C. Parhon et M. Golstein, *Les sécrétions internes. Paris 1909.* — **Ch. Sajous**, *The internal secretions and the principles of medicine, 5. Aufl. Philadelphia 1913.* — **E. H. Starling**, *Die chemische Koordination der Körpertätigkeiten. Verhandlungen der Ges. deutscher Naturforscher und Aerzte, 1906.* — **Sw. Vincent**, *Innere Sekretion und Drüsen ohne Ausführungsgang. Ergebnisse der Physiologie von Asher-Spiro, Bd. IX und XI.* — **Derselbe**, *Internal Secretion and the Ductless Glands. London 1912.* — *Die einzelne innersekretorische Organe behandelnden Arbeiten. Schilddrüse:* **A. Biedl**, *Innere Sekretion. Vorlesungen 1902. Wien 1903.* — **E. Bircher**, *Fortfall und Aenderung der Schilddrüsenfunktion als Krankheitsursache. Ergebnisse der allgemeinen Pathologie von Lubarsch-Ostertag, Bd. 15, Teil I.* — **v. Eiselsberg**, *Die Krankheiten der Schilddrüsen. Deutsche Chirurgie, Lief. 38, 1901.* — **Ewald**, *Die Erkrankungen der Schilddrüse. Myxödem und Kretinismus, 2. Aufl. Wien 1909.* — *Epithelkörperchen:* **A. Kohn**, *Die Epithelkörperchen. Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte v. Merkel-Bonnet, Bd. 9.* — **F. Landois**, *Die Epithelkörperchen. Ergebnisse d. Chirurgie, Bd. I, 1910.* — **L. Morel**, *Les parathyroïdes. Paris 1912.* — **Ochsner and Thompson**, *The surgery and pathology of thyroid and parathyroid glands. St. Louis 1910.* — **A. Pepere**, *Le ghiandole paratiroidee. Ricerche anatomiche e sperimentali. Torino 1906.* — *Thymus:* **A. Hammar**, *Fünfzig Jahre Thymusforschung. Ergebn. d. Anatomie und Entwickelungsgesch., Bd. 19, 1910.* — **H. Klose**, *Chirurgie der Thymusdrüse. Neue Deutsche Chirurgie, 3. Bd. Stuttgart 1912.* — **H. Matti**, *Physiologie und Pathologie der Thymusdrüse. Ergebnisse d. inneren Medizin und Kinderheilkunde, Bd. 10, 1913.* — **Wiesel**, *Pathologie der Thymus. Ergebnisse der allgem. Pathologie, Bd. 15, 1912.* — *Nebennieren:* **G. Bayer**, *Die normale und pathologische Physiologie des chromaffinen Gewebes der Nebennieren. Ergebnisse der allgemeinen Pathologie, Bd. 14, 1910.* — **A. Bittorf**, *Die Pathologie der Nebennieren und der Morbus Addisonii. Jena 1908.* — **A. Kohn**, *Das chromaffine Gewebe. Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte, Bd. 12, 1902.* — **Neusser und Wiesel**, *Die Erkrankungen der Nebennieren. Wien 1910.* — **N. Pende**, *Patologia dell' apparecchio surrenale e degli organi parasimpatici. Milano 1909.* — **H. Poll**, *Die vergleichende Entwickelungsgeschichte der Nebennierensysteme der Wirbeltiere. Hertwigs Handbuch d. vergl. und exper. Entwickelungsgeschichte, Bd. 3, 1906.* — *Hypophyse:* **B. Aschner**, *Ueber die Funktion der Hypophyse. Archiv f. d. gesamte Physiologie, Bd. 146, S. 1, 1912.* — **L. Borchardt**, *Funktion und funktionelle Erkrankungen der Hypophyse. Ergebnisse der inneren Medizin, Bd. 3, 1909.* — — **H. Cushing**, *The pituitary body and its disorders. Philadelphia-London 1912.* — **Delille**, *L'hypophyse et la médication hypophysaire. Paris 1909.* — **E. A. Schäfer**, *Die Funktionen des Gehirnanhanges (Hypophysis cerebri). Berner Universitätsschriften, Heft 3, 1911.* — *Zirbel:* **C. Foà**, *Hypertrophie des testicules et de la crête après l'exstirpation de la glande pinéale chez le coq. Archives Italiennes de Biologie, Bd. 57, 1912.* — **Marburg**, *Zur Kenntnis der normalen und pathologischen Histologie der Zirbeldrüse. Arb. aus dem neurolog. Inst. Wien. Bd. 17, 1909.* — *Pankreas:* **F. Albrecht**, *Pathologie der Bauchspeicheldrüse. Ergebnisse der allgemeinen Pathologie, Bd. 15 II, 1912.* — **Gellé**, *Ueber die Entwickelung der Langerhans'schen Inseln bei den Wirbeltieren. Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte, Bd. 20, II, 1912.* — **K. A. Heiberg**, *Die Inseln in der Bauchspeicheldrüse (Langerhanssche Inseln) nebst kurzer Uebersicht über einige andere neuere Pankreasarbeiten. Ergebnisse der Anatomie und Entwickelungsgeschichte, Bd. 19, 1909.* — **U. Lombroso**, *Die Gewebselemente, welche die innere Funktion des Pankreas besorgen. Ergebnisse der Physiologie, Bd. 9, 1909.* — **C. von Noorden**, *Die Zuckerkrankheit, 6. Aufl. Berlin 1912.* — *Keimdrüsen:* **P. Bouin et P. Ancel**, *Recherches sur la significations phys. de la glande interstitielle du testicule chez les mammifères. Journ. de phys. et path. gen., Bd. 6, 1904.* — **Dieselben**, *Recherches sur les fonctions du corps jaune gestatif. Ibid. Bd. 12 u. 13, 1910—11.* — **R. Hertwig**, *Ueber den derzeitigen Stand des Sexualitätsproblems nebst eigenen Untersuchungen. Biol. Centralbl.* **32**, *Heft 1, 2, 3, 1912.* — **P. Kammerer**, *Ursprung der Geschlechtsunterschiede. Abderhaldens Fortschritte d. naturwissenschaftlichen Forschung, Bd. 5, 1912.* — **St. Kopeć**, *Untersuchungen über Kastration und Transplantation bei Schmetterlingen. Archiv f. Entwickelungsmechanik, Bd. 33, S. 1, 1912.* — **F. A. H. Marshall**, *The physiology of reproduction. London 1910.* — **J. Meisenheimer**, *Experimentelle Studien zur Soma- und Geschlechtsdifferenzierung. Jena. I. Teil 1909, II. Teil 1912.* — **W. Schleip**, *Ueber geschlechtsbestimmende Ursachen im Tierreiche. Ergebnisse und Fortschritte d. Zoologie, Bd. 3, 1912.* — **E. Steinach**, *Willkürliche Umwandlung von Säugetiermännchen in Tiere mit ausgeprägt weiblichen Geschlechtscharakteren u. weiblicher Psyche. Archiv f. d. ges. Physiologie, Bd. 144, 1912.* — **J. Tandler**, *Ueber den Einfluß der innersekretorischen Anteile der Geschlechtsdrüsen auf die äußere Erscheinung des Menschen. Wiener klinische Wochenschrift, S. 459, 1910.* — **J. Tandler und S. Grosz**, *Einfluß der Kastration auf den Organismus. I. bis III. Mitteilung. Archiv für Entwickelungsmechanik, Bd. 27, 29, 30.* — **W. M. Wheeler**, *The effects of parasitic and other kinds of castration in insects. Journal of Experimental-Zoology, Vol. VIII, p. 377.*

A. Biedl.

G. Pätz'sche Buchdruckerei Lippert & Co. G. m. b. H., Naumburg a. d. S.